



ISSN 1405-0471

Maderay Bosques

Vol. 20, Núm. 3

Marzo 2014

Xalapa, Ver.

Importancia ambiental de los

*agroecosistemas
cafetaleros*

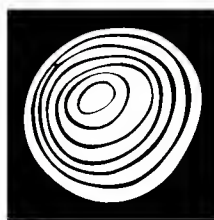
bajo sombra



INECOL
INSTITUTO DE ECOLOGÍA, A.C.

Madera y Bosques

vol. 20 núm. 3 Otoño 2014



comité editorial

Raymundo Dávalos Sotelo
Editor

Dr. Patrick J. Pellicane
Dr. Martín A. Mendoza Briseño
Dr. Ariel Lugo
M.C. Freddy Rojas Rodríguez
Dr. Alejandro Velázquez Martínez

Reyna Paula Zárate Morales
Producción editorial

Aída Pozos Villanueva
Maquetación

Gina Gallo
Diseño de portada

consejo editorial

Dr. Óscar Aguirre Calderón
Universidad Autónoma de Nuevo León, México

M. I. Miguel Cerón Cardeña
Universidad Autónoma de Yucatán, México

M.C. Mario Fuentes Salinas
Universidad Autónoma de Chapingo, México

Dr. Rubén F. González Laredo
Instituto Tecnológico de Durango, México

Dr. Raymond P. Guries.
University of Wisconsin, EUA

Dr. Lázaro R. Sánchez Velázquez
Universidad Veracruzana, México

Dr. Amador Honorato Salazar
*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,
Agrícolas y Pecuarias, México*

Dr. Ezequiel Montes Ruelas
Universidad de Guadalajara, México

Dr. José de Jesús Návar Cháidez
Instituto Politécnico Nacional, Durango, México

Dra. Carmen de la Paz Pérez Olvera
Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México.

Dr. Hugo Ramírez Maldonado
Universidad Autónoma de Chapingo, México

Dra. María de los Ángeles Rechy de von Roth
Universidad Autónoma de Nuevo León, México

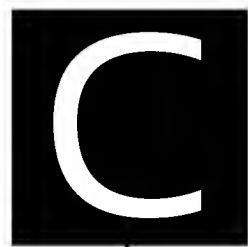
Dr. Víctor L. Barradas Miranda
Instituto de Ecología, UNAM, México

Madera y Bosques, Año 20, núm. 3, diciembre 2014, es una publicación cuatrimestral editada por el Instituto de Ecología, A.C. Carretera Antigua a Coatepec núm. 351. Col. El Haya, C.P. 91070, Tel. (228) 8421800, ext. 6106, www.inecol.mx, mabosque@inecol.edu.mx. Editor responsable: Dr. Raymundo Dávalos Sotelo. Reserva de Derecho al Uso Exclusivo núm. 04-2012-10231210900-102, ISSN 1405-0471, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor, Licitud de Título núm. 12906 y Licitud de Contenido núm. 10479, ambos otorgados por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. Impresa por Tavera Hermanos, S.A. de C.V., Av. Lázaro Cárdenas 3052. Col. Chapultepec Sur, C.P. 58260, Morelia, Michoacán, este número se terminó de imprimir el 1 de diciembre de 2014 con un tiraje de 300 ejemplares.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del editor.

La suscripción anual para 2014 es de \$450.00+\$250 para gastos de envío al interior de la República y \$50.00 USD al extranjero (no incluye gastos de envío). Precio por ejemplares sueltos \$200.00 y \$20.00 USD, respectivamente. Incluye costos de envío por correo aéreo. Suscripciones en México en International Magazine Subscriptions, Tenochtitlan núm. 26 LIO M7, Ampl. Tlacuitlapa, 01650 México, D.F. México, Tel/Fax (55) 5643-2939. C.e.: mmaximo@yahoo.com.mx. Donaciones e intercambios, en el Instituto de Ecología, A.C., al c.e.: libros@inecol.edu.mx.



Contenido

artículos de actualidad

11

Transformación de biomasa en combustibles de segunda generación

Laura Faba, Eva Díaz y Salvador Ordóñez

artículos de investigación

27

Importancia ambiental de los agroecosistemas cafetaleros bajo sombra en la zona central montañosa del estado de Veracruz, México

Laura C. Ruelas-Monjardín, Martha Elena Nava-Tablada, Juan Cervantes y Víctor L. Barradas

41

Respuesta de insectos descortezadores de pino y de sus depredadores a semioquímicos en el sur de México

Jorge Enrique Macías-Sámano, Martha Laura Rivera-Granados, Robert Jones y Guillermo Ibarra

49

Avaliação de painéis aglomerados de *Toona ciliata* produzidos com diferentes densidades e teores de resina

Rosilani Trianoski, Setsuo Iwakiri e Jorge Luis Matos

59

Desfibrado de maderas obtenidas desde las oficinas salitreras de Humberstone y Santa Laura en Chile. Un sitio del patrimonio mundial

Rodrigo Ortiz y Robert Blanchette

69

Anatomía de la madera de doce especies de un bosque mesófilo de montaña de Tamaulipas, México

Moisés Aguilar-Alcántara, Silvia Aguilar-Rodríguez y Teresa Terrazas

87

Anatomía del culmo de bambú (*Guadua aculeata* Rupr.) de la región nororiental del estado de Puebla, México

Idalia Zaragoza-Hernández, Amparo Borja de la Rosa, Francisco José Zamudio-Sánchez, Víctor Rubén Ordóñez-Candelaria y Guadalupe Martha Bárcenas-Pazos

97

Desarrollo de *pellets* a partir de tres especies leñosas bajo condiciones mediterráneas

Harald Fernández-Puratich, José Vicente Oliver-Villanueva, Mireya Valiente, Salvador Verdú y Nuria Albert

113

Comportamiento elástico de la madera de *Acer rubrum* y de *Abies balsamea*

Saúl Antonio Hernández-Maldonado y Javier Ramón Sotomayor-Castellanos

125

Histoquímica, contenido de fenoles totales y actividad antioxidante de hoja y de madera de *Litsea glaucescens* Kunth (Lauraceae)

Nery Alicia Tapia-Torres, Carmen de la Paz-Pérez-Olvera, Angélica Román-Guerrero, Alejandra Quintanar-Isaías, Eristeo García-Márquez y Francisco Cruz-Sosa

139

Sensibilidad climática de tres versiones dendrocronológicas para una conífera mexicana

Marín Pompa-García, Raymundo Dávalos-Sotelo, Efraín Rodríguez-Téllez, Óscar A. Aguirre-Calderón y Eduardo J. Treviño-Garza

notas científicas

155

Análisis dimensional para determinar volumen y peso de madera de mezquite (*Prosopis* L.)

José Antonio Hernández-Herrera, Luis Manuel Valenzuela-Núñez, Arnoldo Flores-Hernández y Julio César Ríos-Saucedo

Portada:
Cafetal bajo sombra en
Teocelo, Veracruz, México

Foto de **Martha Elena
Nava-Tablada**



C Contents

topical papers

11

From biomass to second generation biofuels

Laura Faba, Eva Díaz and Salvador Ordóñez

research papers

27

Environmental importance of coffee shade agroecosystems of the mountainous central zone of Veracruz state, Mexico

Laura C. Ruelas-Monjardín, Martha Elena Nava-Tablada, Juan Cervantes and Víctor L. Barradas

41

Response of bark beetles and their predators to semiochemicals in southeast Mexico

Jorge Enrique Macías-Sámano, Martha Laura Rivera-Granados, Robert Jones and Guillermo Ibarra

49

Evaluation of particleboard of *Toona ciliata* produced with different densities and resin levels

Rosilani Trianoski, Setsuo Iwakiri and Jorge Luis Matos

59

Defibration wood obtained from the Saltpeter Works Humberstone and Santa Laura in Chile. World Heritage Sites

Rodrigo Ortiz and Robert Blanchette

69

Wood anatomy of twelve species of a cloud forest from Tamaulipas, Mexico

Moisés Aguilar-Alcántara, Silvia Aguilar-Rodríguez and Teresa Terrazas

87

Bamboo culms anatomy (*Guadua aculeata* Rupr.) of the northeast region of Puebla state, Mexico

Idalia Zaragoza-Hernández, Amparo Borja de la Rosa, Francisco José Zamudio-Sánchez, Víctor Rubén Ordóñez-Candelaria and Guadalupe Martha Bárcenas-Pazos

97

Pellets development from three woody species under Mediterranean conditions

Harald Fernández-Puratich, José Vicente Oliver-Villanueva, Mireya Valiente, Salvador Verdú and Nuria Albert

113

Elastic behavior of *Acer rubrum* and *Abies balsamea* wood

Saúl Antonio Hernández-Maldonado y Javier Ramón Sotomayor-Castellanos

125

Histochemistry, total phenolic content and antioxidant activity in leaf and wood of *Litsea glaucescens* Kunth (Lauraceae)

Nery Alicia Tapia-Torres, Carmen de la Paz-Pérez-Olvera, Angélica Román-Guerrero, Alejandra Quintanar-Isaías, Eristeo García-Márquez and Francisco Cruz-Sosa

139

Climatic sensibility of three dendrochronological indexes for a Mexican conifer

Marín Pompa-García, Raymundo Dávalos-Sotelo, Efraín Rodríguez-Téllez, Óscar A. Aguirre-Calderón and Eduardo J. Treviño-Garza

scientific notes

155

Dimensional analysis to determine volume and weight of mezquite wood (*Prosopis* L.)

José Antonio Hernández-Herrera, Luis Manuel Valenzuela-Núñez, Arnoldo Flores-Hernández and Julio César Ríos-Saucedo

Cover:
Coffee plantation under shade
in Teocelo, Veracruz, Mexico

Photo by **Martha Elena
Nava-Tablada**



Este número ve la luz cuando las condiciones sociales de México están en un contexto demasiado preocupante. La violencia desatada en ciertas regiones ha causado una gran consternación en la sociedad y ha conducido a un gran número de manifestaciones sociales, tanto el sentido de marchas y plantones como en el sentido de las redes sociales. Es realmente una situación como pocas veces se han visto en México. La única luz de inspiración es que todos los sectores de la sociedad han manifestado una gran solidaridad con los afectados por la violencia, los estudiantes normalistas principalmente, y han dejado oír su voz con gran claridad y firmeza, pero de manera pacífica. Esperemos que este tipo de expresiones permitan que el tejido social del país se vaya recomponiendo gradualmente y se recupere el clima de paz que no hace mucho tiempo disfrutaba México. No todo son malas noticias, afortunadamente, y en el ámbito de la ciencia y tecnología, es importante destacar que el titular del Ejecutivo Federal ha anunciado importantes incrementos a las inversiones en este campo, lo que, de cumplirse a cabalidad, augura tiempos mejores para la nación, pues sabida es la importancia que tiene el desarrollo científico y tecnológico en el bienestar de los países.

En este número incluimos doce trabajos de gran importancia y calidad técnica. El primero trata sobre la transformación de biomasa en biocombustibles de segunda generación por Faba, Díaz y Ordóñez. Este trabajo tiene como objetivo hacer una revisión de las posibilidades para obtener biocombustibles de segunda generación mediante procesos químicos hidrolíticos. El segundo manuscrito se refiere a la importancia ambiental de los agroecosistemas cafetaleros bajo sombra en la zona central montañosa del estado de Veracruz, México con la autoría de Ruelas-Monjardín, Nava-Tablada, Cervantes y Barradas. El objetivo de este trabajo fue identificar la percepción de los productores sobre la importancia del cultivo de café bajo sombra en la prestación de servicios ambientales y si esto influye en su disposición a conservarlo. Los resultados muestran cambios en el clima regional, así como la identificación de los principales beneficios ambientales de los cafetales por parte de los productores. El tercer texto que publicamos ahora se refiere a la respuesta de insectos descortezadores de pino y de sus depredadores a semioquímicos en el sur de México, por Macías-Sámano, Rivera-Granados, Jones e Ibarra. En este trabajo se documenta la atracción en campo de insectos descortezadores (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) de pino y sus depredadores, a trampas multiembudos cebadas con formulaciones comerciales que contenían una de tres combinaciones de α -pineno con frontalina, ipsenol o con ipsdienol en el sur de México.

El cuarto artículo trata sobre la evaluación de paneles aglomerados de *Toona ciliata* producidos con diferentes densidades y niveles de resina de Trianoski, Iwakiri y Matos. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar las propiedades físicas y mecánicas de tableros aglomerados fabricados con materia prima de *Toona ciliata* producidos con diferentes densidades y niveles de resina. El quinto manuscrito concierne al desfibrado de maderas obtenidas desde las oficinas salitreras de Humberstone y Santa Laura en Chile, un sitio del Patrimonio Mundial por Ortiz y Blanchette. En este trabajo se hizo una descripción y evaluación de los daños observados en las instalaciones pertenecientes a ambas oficinas. Los resultados obtenidos determinaron que el deterioro evidenciado es de tipo químico, producto de la acumulación de sales en las maderas y cuyo efecto está asociado con la degradación de la lamela media altamente lignificada en maderas de las especies de *Pseudotsuga menziesii* y *Nothofagus obliqua*. El sexto trabajo se refiere a la anatomía de la madera de doce especies de un bosque mesófilo de montaña de Tamaulipas, México, por Aguilar-Alcántara, Aguilar-Rodríguez y Terrazas. En este trabajo se realizó la descripción anatómica de la madera de 12 especies propias del BMM, provenientes de la

Reserva de la Biosfera “El Cielo”, Tamaulipas, el más boreal de México. Los resultados muestran una tendencia a la presencia de anillos de crecimiento evidentes. Se discute el posible significado de la presencia de anillos de crecimiento y se comparan algunos caracteres anatómicos de las especies estudiadas con sus grupos afines a nivel de género y familia.

El siguiente trabajo también toca el tema de la anatomía vegetal, en este caso del culmo de bambú (*Guadua aculeata* Rupr.) de la región nororiental del estado de Puebla, México. El trabajo de Zaragoza-Hernández, Borja de la Rosa, Zamudio-Sánchez, Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos explica que se realizó la caracterización anatómica de la pared de los culmos de *Guadua aculeata* Rupr. El objetivo fue conocer la proporción de las estructuras anatómicas que componen el culmo y las dimensiones de las fibras, para contribuir al conocimiento de la especie. El siguiente trabajo aborda el desarrollo de *pellets* a partir de tres especies leñosas bajo condiciones mediterráneas por Fernández-Puratich, Oliver-Villanueva, Valiente, Verdú y Albert. El objetivo de este trabajo consistió en determinar la aptitud de tres tipos arbóreos como biocombustible sólido. La investigación se centró en la caracterización física, química y energética de la biomasa leñosa de esas especies. El noveno manuscrito presenta el tema del comportamiento elástico de la madera de *Acer rubrum* y de *Abies balsamea*, dos maderas canadienses, por Hernández-Maldonado y Sotomayor-Castellanos. A partir de las características obtenidas empíricamente, se analizaron las propiedades y las relaciones de ortotropía de la matriz de constantes elásticas del modelo elástico general. Los valores experimentales de las características elásticas de las maderas estudiadas son comparables con valores correspondientes a estas maderas determinados en otros estudios.

El décimo manuscrito aborda el asunto de la histoquímica, contenido de fenoles totales y actividad antioxidante de la hoja y de la madera de *Litsea glaucescens* Kunth (Lauraceae) por Tapia-Torres, De la Paz-Pérez-Olvera, Román-Guerrero, Quintanar-Isaías, García-Márquez y Cruz-Sosa. En este estudio se emplearon técnicas histoquímicas para localizar la presencia de compuestos fenólicos como lignina y taninos, así como lípidos y carbohidratos no estructurales en cortes de hoja y de madera; también se cuantificó el contenido de fenoles totales y la actividad antioxidante de extractos acuosos. El décimo primer artículo es denominado Sensibilidad climática de tres versiones dendrocronológicas para una conífera mexicana, por Pompa-García, Dávalos-Sotelo, Rodríguez-Téllez, Aguirre-Calderón y Treviño-Garza. El objetivo de este trabajo fue comparar la sensibilidad climática de tres series dendrocronológicas de *Pinus cooperi*: Estándar (Sd), Residual (Rd), y Arstan (Ar). Se concluye que la debida selección de la versión de las series dendrocronológicas es importante en interpretaciones de escenarios climáticos. El último trabajo es una nota científica sobre el análisis dimensional para determinar volumen y peso de madera de mezquite (*Prosopis* L.) por Hernández-Herrera, Valenzuela-Núñez, Flores-Hernández y Ríos-Saucedo. Este trabajo generó una tabla de volumen en m³ y peso de madera a nivel de predio que puede utilizarse en el área de influencia.

Estamos seguros que estos artículos llenarán una parte importante de los vacíos de información técnica que se tiene en América Latina y España sobre las características y propiedades de los recursos forestales de la región y de los productos que se fabrican a partir de los mismos. Con esta importante aportación, *Madera y Bosques* cumple con su tarea de diseminar la información científica entre países de habla hispana y portuguesa, con la fundada esperanza de que sea de utilidad para los lectores.

Raymundo Dávalos Sotelo
Editor

e^ditorial

This issue sees the light when social conditions in Mexico are becoming too worrisome. The violence in certain regions has caused a great consternation in society and has led to a large number of social manifestations, both in the sense of marches and sit-ins as in the sense of social networks. It is really a situation like there have been few times in Mexico. The only light of inspiration is that all sectors of society have shown great solidarity with those affected by the violence, the students of teacher's schools primarily, and have left their voice be heard with great clarity and firmness, but in a peaceful manner. Hopefully, this kind of expressions will allow that the social fabric of the country gets recomposed gradually and recovers the peaceful state that not too long ago was enjoyed in Mexico. Not everything is bad news, fortunately, and in the field of science and technology, the head of the Federal Executive Branch of the Government, the President of the Republic, has announced significant increases to the investment in this field, which if fully complied, portends better times for the nation, as it is well known the importance that scientific and technological development has in the well-being of the countries.

In this issue we have included twelve works of great importance and technical quality. The first is about the transformation of biomass into second-generation biofuels by Faba, Díaz and Ordóñez. This work aims to make a review of the possibilities for second-generation biofuels using hydrolytic chemical process. The second manuscript refers to the environmental importance of coffee agroecosystems under shadow in the central mountainous region of the State of Veracruz, Mexico with the authorship of Ruelas-Monjardin, Tablada-Nava, Cervantes and Barradas. The objective of this study was to identify the perception of the producers about the importance of growing coffee under shade in the provision of environmental services and if this affects their willingness to conserve it. The results show changes in regional climate, as well as the identification of the main environmental benefits of coffee plantations by the producers. The third text refers to the response of predators and pine beetles to semiochemicals in the South of Mexico, by Macías-Sámano, Rivera-Granados, Jones, and Ibarra. This work documents the attraction in field of beetles (Coleoptera: Curculionidae, scolytinae) of pine and their predators, by multi-funnel traps baited with commercial formulations. The different responses of the trapped insects are discussed in the light of similar works, emphasizing variations found in bark beetle-predator guilds and the response to semiochemicals between the populations of the United States and the south of Mexico.

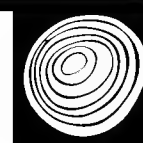
The fourth article deals with the evaluation of particleboard made with wood of *Toona ciliata* produced with different densities and levels of resin, by Trianoski, Iwakiri, and Matos. The results indicate that all treatments met the minimum requirements established by the standards of reference. Panels produced with least amount of raw material, in addition to complying with statutory requirements, indicated an economy of up to 23.7% in quantities of particles, of to 42.8% on quantities of resin and catalyst, when compared with the other treatments. The fifth manuscript concerns the defibration of wood obtained from the saltpeter offices of Humberstone and Santa Laura in Chile, a World Heritage Site by Ortiz and Blanchette. This work consists in a description and assessment of the damage observed in facilities belonging to both offices. The results determined that evidenced deterioration is chemical product type of the accumulation of salts in the woods, and whose effect is associated with degradation of the highly lignified middle lamella in wood of species of *Pseudotsuga menziesii* and *Nothofagus obliqua*. The sixth work refers to the wood anatomy of twelve species of mountain cloud forest (MCF) from Tamaulipas, Mexico, by Aguilar-Alcántara, Aguilar-Rodríguez and Terrazas. In this work the anatomical description of the wood of 12 species of the MCF, was made, with specimens coming from the reserve of the

biosphere 'El Cielo', Tamaulipas, which corresponds to the more northern of Mexico. The results show a trend to the presence of evident growth rings; this character seems to be related to the geographical position of the MCF. The authors discussed the possible meaning of the presence of rings growth and compared some anatomical characters of the species with their affinity groups at the level of genus and family. The next paper also deals with the subject matter of plant anatomy, in this case the culms of bamboo (*Bamboo aculeata* Rupr.) of the northeastern region of the State of Puebla, Mexico. The work of Zaragoza-Hernández, Borja de la Rosa, Zamudio-Sánchez, Ordóñez-Candelaria and Bárcenas-Pazos had the objective of knowing the proportion of the anatomical structures that compose the culm and the dimensions of the fibers, to contribute to the knowledge of the species. The following work addresses the development of pellets from three woody species under Mediterranean conditions by Fernández-Puratich, Oliver-Villanueva, Valiente, Verdú and Albert. The objective of this work consisted in determining the suitability of three tree species as solid biofuel. The main results show that the biomass of each studied species is suitable for energy use as solid biofuel, with the exception of the wood of orange tree that has some limitations for the manufacture of pellets. The ninth manuscript presents the theme of the elastic behaviour of the wood of *Acer rubrum* and *Abies balsamea*, two Canadian woods, by Hernandez Maldonado and Sotomayor-Castellanos. From the characteristics obtained empirically, the authors analyzed the properties and orthotropy relationships of the matrix of elastic constants of general elastic model. The experimental values of the elastic characteristics of the wood studied are comparable to values corresponding to these woods determined in other studies.

The tenth manuscript deals with the topic of the hystochemistry, total phenolics and antioxidant activity of leaf and wood content of *Litsea glaucescens* Kunth (Lauraceae) by Tapia-Torres, De la Paz-Pérez-Olvera, Quintanar-Isaías, Román-Guerrero, García-Márquez and Cruz-Sosa. In the study, hystochemical techniques were used to locate the presence of phenolic compounds such as lignin and tannins as well as lipid and non-structural carbohydrate in leaf and wood cuttings. According to the results obtained, it is possible to establish a relationship between the content and the distribution of phenolic compounds in plant tissues and its antioxidant activity with use potential in traditional medicine. The next article, called "Climate sensibility of three dendro-chronological indexes for a Mexican conifer " by Pompa-García, Dávalos-Sotelo, Rodríguez-Téllez, Aguirre-Calderón and Treviño-Garza had the objective of comparing the climate sensitivity of three dendrochronological series of *Pinus cooperi*: standard (Sd), Residual (Rd), and Arstan (Ar). It is concluded that proper selection of the version of the dendrochronological series is important in interpretations of climate scenarios. The final work is a scientific note on the dimensional analysis to determine volume and weight of wood of mesquite (*Prosopis* L.) by Hernández-Herrera, Valenzuela-Núñez, Flores-Hernández and Ríos-Saucedo. This work generated a table of volume in m³ and weight of wood at the level of land that can be used in the area of influence.

We are confident that these articles will fill an important part of technical information that is still lacking in Latin America and Spain about the characteristics and properties of the forest resources of the region and of the products that are manufactured from these resources. With this important contribution, *Madera y Bosques* journal accomplishes its task of disseminating scientific information among Spanish- and Portuguese-speaking countries with founded hope that is useful to readers.

Raymundo Dávalos Sotelo
Editor



Transformación de biomasa en **biocombustibles** de segunda generación

From biomass to second generation biofuels

Laura Faba¹, Eva Díaz¹ y Salvador Ordóñez¹

¹ Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente. Facultad de Química, Universidad de Oviedo. Oviedo, España. diazfeva@uniovi.es

RESUMEN

El agotamiento de las materias primas no renovables, así como la creciente conciencia ambiental ha motivado la valorización de la biomasa para la producción de energía. Aunque los primeros esfuerzos se centraron en el desarrollo de los biocombustibles de primera generación -según la materia prima con que se producen-, la tendencia actual es hacia la investigación en los biocombustibles de segunda generación, que permiten la transformación de la biomasa lignocelulósica (obtenida a partir de residuos forestales o de cultivos, maderas de bajo precio o serrín) en energía. La transformación de la madera en biocombustibles puede llevarse a cabo por vías biológicas o químicas. Entre las rutas químicas, hay tres posibilidades principales: gasificación, pirólisis o hidrólisis. Este trabajo tiene como objetivo hacer una revisión de las posibilidades para obtener biocombustibles de segunda generación mediante procesos químicos hidrolíticos, que implica varios pasos: pretratamiento de la biomasa (que puede ser físico o químico), hidrólisis de la biomasa, deshidratación de los azúcares, condensación aldólica e hidrogenación/deshidratación completa para obtener los alcanos lineales (biodiesel).

PALABRAS CLAVE: aprovechamiento del bosque, condensación aldólica, hidrólisis, lignocelulosa, residuos de cultivos, valorización.

ABSTRACT

The depletion of the non-renewable raw materials as petroleum, coal or natural gas as well as the increasing environmental conscience has motivated the valorization of biomass for energy production. Although the first efforts were focused on the development of the first generation biofuels -according to the raw material-, nowadays the research is focused on the second generation biofuels, which allows the transformation of lignocellulosic biomass (from forest or crops wastes, low-priced woods or sawdust) into energy. The transformation of wood into biofuels can be carried out by biological or chemical means. Among the chemical routes, there are three main possibilities: gasification, pyrolysis or hydrolysis. This paper aims to review the technological advances to obtain biofuels by the third route, since it allows using the most abundant forms of biomass, cellulose and hemicelluloses. This chemical process involves several steps: pretreatment of the biomass (by physical or chemical route), hydrolysis of the biomass, dehydration of sugars, aldolization and hydrogenation/dehydration until *n*-alkanes (biofuels) are achieved.

KEYWORDS: forest use, aldol condensation, hydrolysis, lignocelluloses, crops wastes, valorization.

INTRODUCCIÓN

La creciente concienciación acerca de los problemas medioambientales de nuestro planeta, con el consiguiente desarrollo y endurecimiento de la legislación a este respecto, ha impulsado el aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía en general, y de biocombustibles

líquidos en particular. La producción actual de biodiesel y bioetanol se basa en materias primas oleaginosas y almidonadas/azucaradas, respectivamente, lo que ha generado un gran debate acerca de su sostenibilidad (Gorter *et al.*, 2013).

Estos biocombustibles de primera generación trajeron consigo grandes problemas sociales y ambientales. Por un lado, el precio de los productos agrarios se incrementó de forma importante debido al aumento de la demanda de estos cultivos para producir biocombustibles, creando situaciones especialmente difíciles para la población de países como Brasil o México (Gorter *et al.*, 2013). Por otro lado, se encuentran los graves problemas medioambientales debido a la deforestación. Un ejemplo de esta situación se encuentra en Indonesia, donde se destinaron 20 000 ha al cultivo de palma para la producción de biodiesel, utilizando el terreno que previamente era selva tropical (Obidzinski *et al.*, 2012).

En este contexto, la Unión Europea revisó recientemente su objetivo para el año 2020, que era cubrir con biocombustibles primarios 10% de la energía del transporte (Magrama, 2011). Dentro de este 10%, la Unión Europea ha decidido que se pueda cubrir también con hidrógeno, paneles solares o cualquier otra fuente renovable (Directiva 2009/28/CE). Así, en contra de las expectativas creadas en la década del 2000, y pese al apoyo de muchos gobiernos, el mercado mundial lleva tiempo acumulando excedentes de biocombustibles primarios (Sampedro, 2009).

Con estos antecedentes, los biocombustibles de segunda generación obtenidos a partir de biomasa lignocelulósica son una alternativa interesante, ya que las materias primas lignocelulósicas no compiten con los cultivos alimentarios y también tienen un precio más competitivo que las materias primas agrícolas convencionales (Gómez *et al.*, 2013). En principio, existen dos opciones para abastecer la demanda de la materia prima para la producción de los biocombustibles de segunda generación (en adelante, biocombustibles). Una primera opción consistiría en aprovechar los residuos agrícolas o procedentes de la madera, aunque estos residuos parecen a todas luces insuficientes (FAO, 2008), por lo que los procesos de segunda generación podrían ser más rentables si se integrasen en las instalaciones manufactureras existentes, por ejemplo de fabricación del papel, que producen biomasa barata o subproductos de biomasa. La segunda opción es crear una

reserva forestal mediante plantaciones para abastecer las necesidades de materia prima (Gómez *et al.*, 2008). La biomasa lignocelulósica es la materia prima renovable más abundante, su producción anual se ha estimado 1×10^{10} millones de toneladas alrededor del mundo (Sánchez y Cardona, 2008).

El principal problema de estos combustibles es la dificultad tecnológica en su producción, pudiendo seguir la transformación de la biomasa en una biorefinería tres vías principales: pirólisis o licuefacción, hidrólisis y gasificación (Huber y Dumesic, 2006). Algunos de estos procesos son ya una realidad. Industrias Choren (Alemania) ha empezado en el año 2010 a producir trece mil quinientas toneladas de biodiesel a partir de residuos de madera mediante una técnica propia llamada Carbo-V basada en la gasificación. En el mismo sentido, investigadores de la Universidad de Georgia han optimizado un proceso de aprovechamiento de la madera basado en la pirólisis que permite transformar 17% del peso de la madera seca en biodiesel (García-Pérez *et al.*, 2007).

En el presente artículo se aborda el proceso de obtención de biodiesel a partir de biomasa residual mediante procesos en fase acuosa (hidrólisis) por ser la vía que da lugar a un combustible de mejor calidad (índice de octano adecuado) con mayor rendimiento y menor gasto energético (condiciones de operación más suaves). El proceso de transformación de la biomasa en combustibles (líquidos y gaseosos) en una biorrefinería por vía hidrolítica se muestra en la figura 1.

Este proceso supone una oportunidad para aunar la protección de la superficie forestal con su aprovechamiento industrial. No hay que olvidar el papel del bosque como el único medio de la biosfera que regula la hidrología y la biogeoquímica terrestre, influyendo la cubierta forestal tanto en el suelo como en el agua. Cultivar el bosque puede ser la forma ideal de obtener/conservar estos beneficios, haciendo que el CO₂ capturado se transforme en fuente de energía –se estima que por cada tonelada de madera que crece en un bosque, se absorbe 1,47 t de dióxido de carbono (Dávalos-Sotelo, 1996).

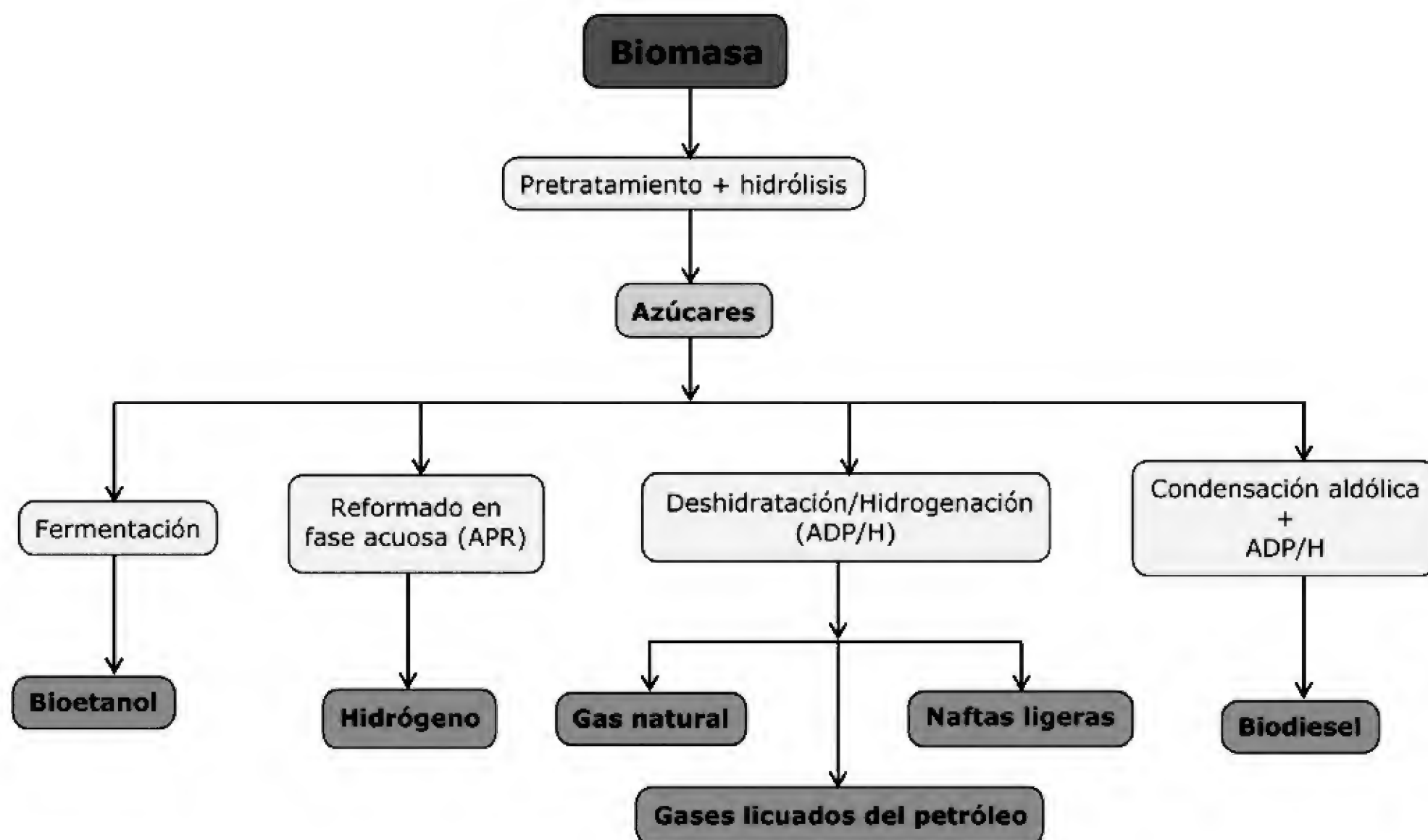


FIGURA 1. Diferentes alternativas químicas para la transformación de la biomasa en productos de valor energético. La cuarta opción consiste en el proceso de transformación de la biomasa en combustibles por vía hidrolítica.

OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES A PARTIR DE BIOMASA HEMICELULÓSICA MEDIANTE TRATAMIENTOS EN FASE ACUOSA

Teniendo en cuenta que la hemicelulosa tiene un valor industrial despreciable respecto al de la celulosa (materia prima en la fabricación de papel, barnices, explosivos, etc.) (Njoku *et al.*, 2013), la obtención de biocombustibles se plantea como una valorización de la hemicelulosa, aunque los mismos tratamientos podrían ser aplicados a la fracción celulósica. En la figura 2 se muestra un esquema del proceso considerado en este trabajo, cuyas partes principales se especifican a continuación:

- Pretratamiento de la biomasa
- Hidrólisis de la biomasa
- Deshidratación de los azúcares
- Condensación aldólica de los aldehídos obtenidos
- Hidrogenación/deshidratación completa para la obtención de los alcanos lineales (biodiesel).

Pretratamiento de la biomasa

El pretratamiento de la biomasa permite eliminar la lignina y extraer la fracción hemicelulósica. Esta etapa es importante ya que la lignina tiene una reactividad muy diferente a la del resto de los componentes de la biomasa, y la consideración conjunta con la hemicelulosa y la celulosa daría lugar a reacciones secundarias y numerosos productos no deseados. Esta etapa es una de las que más encarece el proceso de obtención de biocombustibles, llegando a suponer 20% del costo total. Los pretratamientos incluyen procesos físicos, químicos, térmicos o, incluso, la combinación de los tres (Tagliabue *et al.*, 2008). El pretratamiento de la biomasa es necesario para reducir el tamaño de la materia prima (y así facilitar los procesos siguientes), limitar la formación de productos de degradación que inhiben el crecimiento de microorganismos necesarios en los procesos biológicos, minimizar la demanda energética de las reacciones posteriores y,

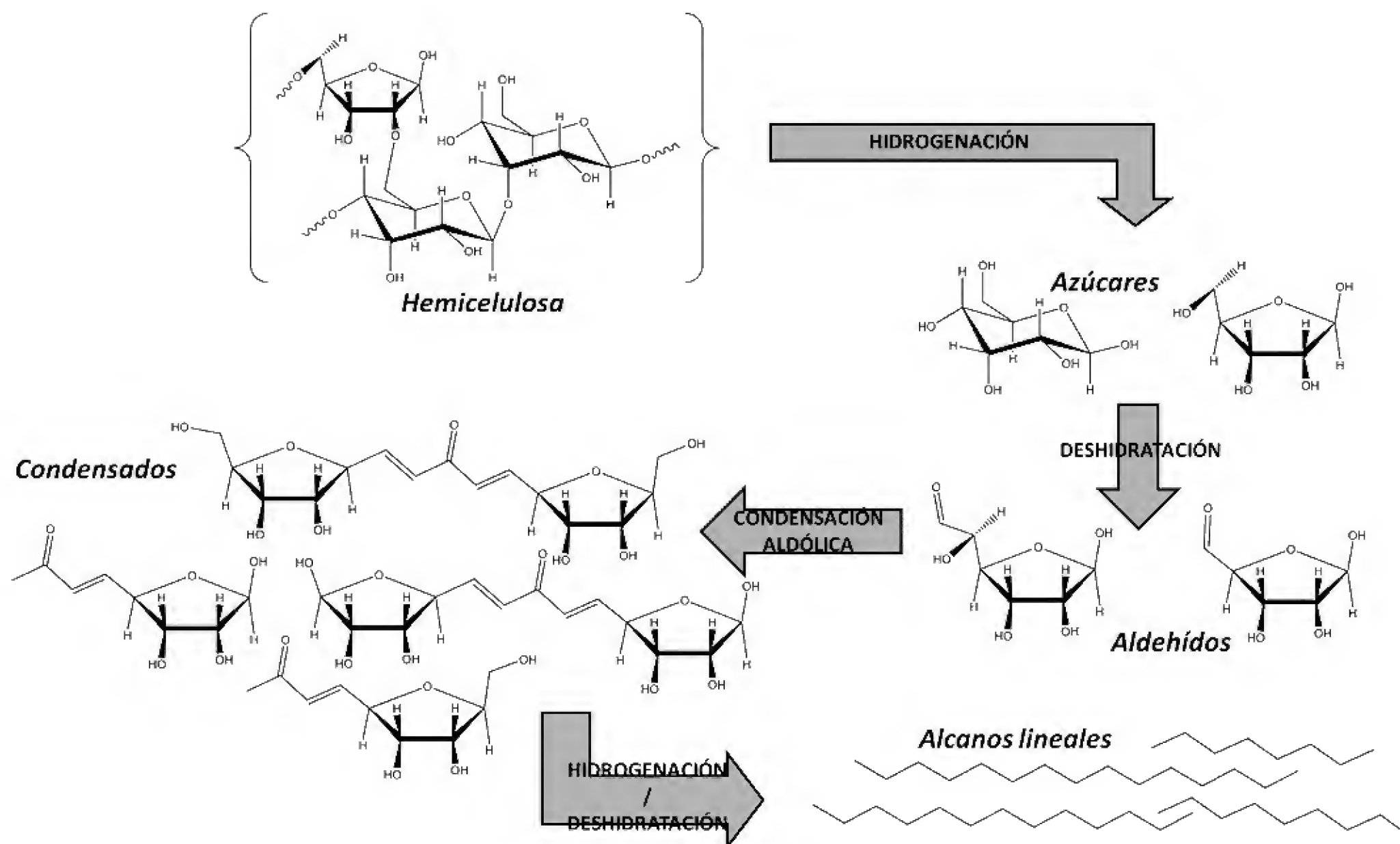


FIGURA 2. Esquema del proceso de obtención de biocombustibles a partir de hemicelulosa residual (Huber y Dumesic, 2006).

por tanto, limitar su costo. Consecuentemente, además de la buena separación de la fracción deseada, uno de los parámetros más importantes que definirán el proceso aplicado será el bajo costo del catalizador de pretratamiento o su posibilidad de reutilización. En la tabla 1 se resumen las condiciones de operación y los principales efectos obtenidos con los pretratamientos más utilizados industrialmente.

El pretratamiento físico más extendido se lleva a cabo sometiendo la biomasa a una corriente de vapor a elevada presión, con temperaturas de entre 160 °C y 260 °C, provocando la descompresión de la materia, degradando la hemicelulosa, transformando la lignina e incrementando la digestibilidad de la celulosa (Jackson *et al.*, 2000).

En cuanto a los pretratamientos químicos, pueden tener naturaleza básica o ácida. Están altamente estudiados como paso previo a la hidrólisis enzimática. Los tratamientos básicos actúan, principalmente en la solubilidad

de la lignina, mientras que los ácidos favorecen un fraccionamiento selectivo de la hemicelulosa.

El objetivo del pretratamiento básico es la eliminación de la lignina de la biomasa, incrementando la reactividad de los restantes polisacáridos. En estas condiciones, la hemicelulosa no se solubiliza, pero se puede conseguir modificando algunos sustituyentes de los azúcares.

Los pretratamientos básicos son llevados a cabo a temperaturas bajas (desde la temperatura ambiental hasta los 100 °C) y a menor presión que los físicos. Tienen un tiempo de reacción mucho mayor, comprendido entre las horas y los días, frente a los minutos que dura el pretratamiento físico. Los hidróxidos de sodio, potasio y calcio son los catalizadores más utilizados para estos procedimientos (Mosier *et al.*, 2005). El hidróxido de calcio tiene la ventaja de que puede ser recuperado de la corriente principal por precipitación con dióxido de carbono y reciclado mediante un tratamiento térmico (Chang *et al.*, 1998).

TABLA 1. Diferentes condiciones de operación y efectos de los principales métodos de pretratamiento.

	Descripción	Temperatura de operación (°C)	Tiempo (min)	Efectos	Referencia
AQUASOLV	Tratamiento con vapor de agua (40 MPa)	200	2	Fraccionamiento total de la biomasa sin degradación	Allen <i>et al.</i> , 1996
Solvólisis	Tratamiento con agua	200 – 300	15	Fraccionamiento de 40 – 60 % de la biomasa. Recuperación total de la hemicelulosa	Mok y Antal, 1992
MASONITE	Descompresión explosiva (vapor de agua)	210	5	Fracciona 60 % de la biomasa, alterando la estructura de la lignina	Mason, 1926
Pretratamientos ácidos	Disoluciones de H ₂ SO ₄ (0,45% -0,85%)	160 – 220	30 s – 2 min	Provoca la deshidratación de la hemicelulosa, obteniéndose furfural	Root <i>et al.</i> , 1959
AFEX		100 – 200	5 – 30	Separa y altera la estructura de la lignina, pero no elimina toda la hemicelulosa	Bradshaw <i>et al.</i> , 2007
ARP	Tratamiento con disolución de 5% – 15% NH ₃	160 – 180	14	Separa principalmente la fracción de lignina	Yoon <i>et al.</i> , 1995

Los procesos químicos ácidos, por el contrario, se llevan a cabo con condiciones más selectivas (temperaturas entre 200 °C y 215 °C) y con tiempos más cortos, comprendidos entre 1 y 5 minutos. El proceso más desarrollado en este ámbito se basa en el ácido sulfúrico diluido (1,1%), llevado a cabo a 190 °C durante 2 minutos. Con estas condiciones, se consigue un producto libre de lignina con una riqueza superior a 90%. Sin embargo, este tipo de procesos tiene numerosos inconvenientes, entre los que destacan problemas de corrosión, elevado consumo de productos químicos y problemas de neutralización (Martín *et al.*, 2002).

Hidrólisis de la biomasa

La hidrólisis se considera actualmente como la principal vía de entrada de la biomasa en un proceso de biorefinería (Rinaldi y Schüth, 2009). Consiste en la ruptura de los enlaces β-1,4-glicosídicos que unen las moléculas de celulosa y hemicelulosa, obteniendo los monómeros (azúcares) correspondientes. La primera tecnología desarrollada en este aspecto se conoce como el proceso Scholler, proceso desarrollado en Alemania en 1920 (Faith, 1945). Desde entonces, se han desarrollado diferentes tecnologías para optimizar el gasto energético, minimizar las reacciones secundarias y conseguir una hidrólisis completa en menor tiempo. Las principales técnicas utilizadas industrialmente se resumen en la tabla 2.

TABLA 2. Diferentes condiciones de operación y efectos de los principales métodos de hidrólisis de la biomasa lignocelulósica.

	<i>Descripción</i>	<i>Temperatura de operación (°C)</i>	<i>Tiempo</i>	<i>Efectos</i>	<i>Referencia</i>
Disoluciones de ácidos fuertes	H ₂ SO ₄ en concentraciones 30% – 70%	20 - 50	< 10 min	Solubilización total de la celulosa, generando oligosacáridos y glucosa. Se forman aldehídos por degradación.	Camacho <i>et al.</i> , 1996
Disoluciones ácidas diluidas	H ₂ SO ₄ en concentraciones 10% – 15%	180 - 200	> 1 h	Es necesario llevar a cabo el proceso en dos etapas y la selectividad de la glucosa no supera el 50%	Nguyen <i>et al.</i> , 2000
Hidrólisis hidrotérmicamente	Sin necesidad de catalizador ácido, a 10 MPa - 15 MPa	> 300	< 1 s	Se obtiene la hidrólisis completa de la hemicelulosa y la celulosa	Fang <i>et al.</i> , 2008
Hidrólisis enzimática	Utilizan enzimas tipo celulasas (endoglucanasa, exoglucanasa y celobiohidrolasas)	50	72 h	Pequeñas concentraciones de ácidos pueden inhibir la actividad enzimática	Zhang <i>et al.</i> , 2010

En la actualidad, la tendencia general de desarrollar catalizadores heterogéneos ha favorecido el estudio de la hidrólisis de la biomasa celulósica simultáneamente con la hidrogenación de los azúcares obtenidos, alcanzando en un solo paso azúcares y polialcoholes de elevado valor industrial (Van de Vyer *et al.*, 2011). Esta reacción requiere catalizadores bifuncionales con metales activos para la hidrogenación y centros ácidos para la hidrólisis. Los aluminosilicatos se consideran una de las familias de catalizadores más prometedoras para este proceso. Además, pueden tener aplicaciones en el crecimiento de las moléculas y otros procesos en la refinería, haciendo uso de sus propiedades de tamices moleculares (Mäki-Arvela *et al.*, 2007). Son materiales cuya recuperación y reutilización es sencilla, cumpliendo con los preceptos de la sostenibilidad y química verde.

La hidrogenación directa de los azúcares obtenidos en la hidrólisis (xilosa, glucosa, fructosa...) daría lugar a hexanos y pentanos no ramificados, sustitutos de la gasolina pero con muy bajo índice de octano (mala calidad). Para obtener un combustible de elevada calidad es necesario aumentar la longitud de la cadena carbonosa hasta rangos C8-C15 (rango del diesel mineral) y eliminar los átomos de oxígeno presentes en estas moléculas. Sin embargo, estos azúcares son muy poco reactivos, por lo que es necesario transformar estos compuestos en otros conteniendo, por ejemplo, aldehídos, que tienen mayor reactividad. Los azúcares son transformados en aldehídos aromáticos (familia del furfural) mediante un proceso de deshidratación (Faba *et al.*, 2011; Ordóñez *et al.*, 2011). Estos aldehídos son susceptibles de generar enlaces C-C mediante reacciones de condensación aldólica, hasta

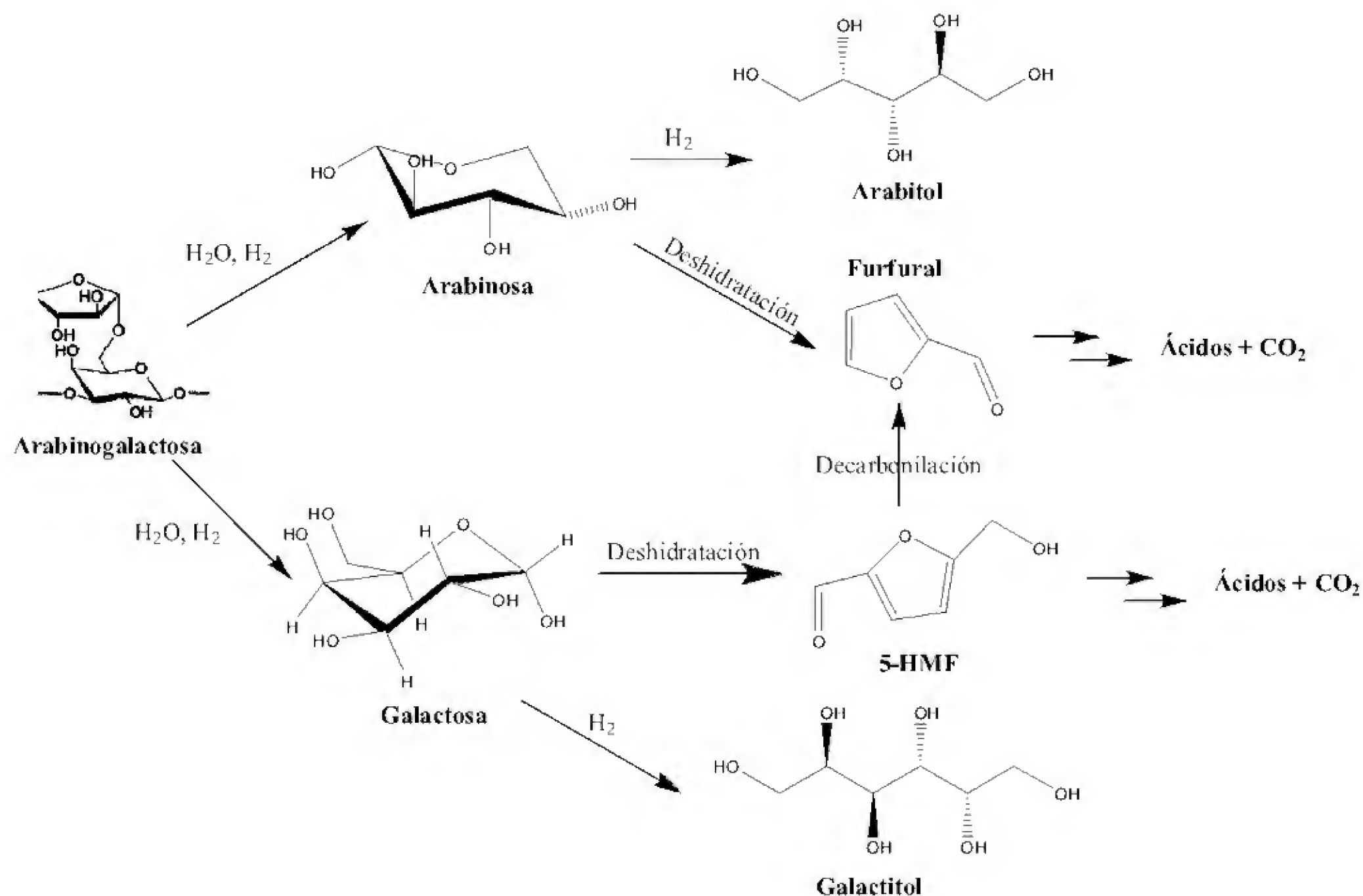


FIGURA 3. Esquema de las diferentes etapas que transcurren durante la hidrogenación-hidrolítica de la hemicelulosa (Kusema *et al.*, 2012).

alcanzar la longitud de cadena carbonosa óptima (Faba *et al.*, 2011, 2012, 2013).

Combinando la hidrólisis y la hidrogenación se pueden obtener polialcoholes utilizando agua como disolvente a elevadas temperaturas y en presencia de hidrógeno, con buenos resultados de conversión (100% en menos de 4 horas) y selectividad (80% en 4 horas) (Kusema *et al.*, 2012). Tras alcanzar la selectividad máxima se produce una degradación de los productos, debido a las condiciones de temperatura y la acidez del catalizador, que provoca la degradación de los alcoholes en aldehídos (furanos) por deshidratación. Este proceso se conoce como hidrogenación-hidrolítica, cuyo esquema se muestra en la figura 3.

Modificando las propiedades de los catalizadores heterogéneos, la formación de furanos se puede eliminar

prácticamente al 100% (los polialcoholes son materia prima para la obtención de diversos compuestos) u optimizar, pasando a ser estos los productos principales. La formación de aldehídos (furfural a partir de pentosas, 5-HMF a partir de hexosas) es interesante, ya que son el punto de partida para el desarrollo de biocombustibles por reacciones de condensación aldólica e hidrogenación. De esta forma, optimizando la obtención de aldehídos no sería necesaria una etapa posterior de deshidratación (Kusema *et al.*, 2012; Faba *et al.*, 2014).

Deshidratación de azúcares

La obtención de aldehídos mediante la deshidratación de azúcares (hexosas y pentosas) es uno de los procesos industriales más utilizados actualmente para la obtención

de estos intermedios de gran interés para la síntesis de numerosos productos químicos. Los primeros estudios en este campo fueron llevados a cabo en 1987 (Musau y Manavu, 1987) utilizando dimetilsulfóxido (DMSO) como agente deshidratante, a 150 °C en medio acuoso, obteniendo más de 92% de selectividad al hidroximetilfurfural (HMF) en 2 horas. A pesar de los buenos resultados, las tendencias actuales de eliminar los catalizadores homogéneos han favorecido el estudio de procesos alternativos utilizando catalizadores ácidos sólidos. En la tabla 3 se recogen los principales estudios en este ámbito.

Como se comentó en el apartado anterior, la catálisis heterogénea favorece el desarrollo de catalizadores heterogéneos con actividad simultánea para más de un pro-

ceso. Dada la similitud en las condiciones de operación en las etapas de hidrogenación y deshidratación, la combinación de ambas reacciones (hidrogenación-hidrolítica) se ofrece como una buena alternativa para unificar procesos y eliminar costos. En la tabla 3 se incluyen también los principales estudios en este campo, si bien hay que destacar que actualmente se enfocan más a la obtención de polialcoholes que de aldehídos.

Condensación aldólica

La condensación aldólica es el paso intermedio clave para formar moléculas orgánicas de cadena larga utilizando compuestos carbonílicos (aldehídos) derivados de hidratos de carbono. Es una reacción química orgánica donde en

TABLA 3. Condiciones de operación y resultados obtenidos en los principales estudios del proceso de deshidratación de azúcares para la obtención de aldehídos.

<i>Materia Prima</i>	<i>Catalizador / Disolvente</i>	<i>Temperatura de operación (°C)</i>	<i>Tiempo</i>	<i>Selectividad aldehídos (%)</i>	<i>Referencia</i>
Glucosa	DMSO / Agua	150	2 h	92	Musau y Munavu, 1987
Fructosa	HCl / Agua	180	< 3 min	50	Román-Leshkov <i>et al.</i> , 2006
Glucosa	TiO ₂ , ZrO ₂ / Agua	200	5 min	23	Watanabe <i>et al.</i> , 2005
Fructosa	ZrP	240	2 min	50	Asghari y Yoshida, 2006
Fructosa	Nb ₂ O ₅ ·nH ₂ O / Agua/butanol	160	< 2 h	89.5	Yang <i>et al.</i> , 2011
Xilosa	H ₂ SO ₄	160	4 h	70	Shi <i>et al.</i> , 2011
Celulosa	Pt-MCM-48	185	24 h	63	Käldstrom <i>et al.</i> , 2011
Hemicelulosa	H-MCM-48	185	3 h	18	Kusema <i>et al.</i> , 2012



medio básico un ión enolato reacciona con un grupo carbonilo para dar lugar al sistema conjugado de un carbonilo α,β -insaturado, producto final, a través de la deshidratación de un intermedio β -hidroxialdehído o una β -hidroxicetona (Vollhardt y Schore, 2008).

Los aldehídos obtenidos en la deshidratación de azúcares no tienen ningún α -H, por lo que no pueden autocondensar, pero poseen grupos aldehídos que pueden reaccionar con otras moléculas formando carbaniones. Por tanto, pueden reaccionar con especies tales como acetona, dihidroxiacetona o gliceraldehído, produciéndose reacciones de condensación cruzada (entre dos especies distintas) que dan lugar a especies de entre nueve y quince átomos de carbono, tal y como se muestra en la figura 4. Se utiliza como donador del α -H la acetona, molécula que posee dos protones con capacidad de condensación y que puede ser obtenido también mediante dos procesos medioambientalmente respetuosos: la pirólisis de biomasa (Mansur *et al.*, 2013) y la fermentación de residuos de biomasa para la producción conjunta de acetona, butanol y etanol (proceso ABE) (Qureshi y Ezeji, 2008).

Los primeros estudios teóricos referenciados en la bibliografía relativos a la condensación aldólica entre aldehídos y cetonas como proceso catalítico para producir precursores de biocombustibles corresponden al grupo del Profesor Dumesic en un artículo del año 2005 sobre procesos acuosos de reformado de biomasa para producir hidrógeno o alcanos (Davda *et al.*, 2005). En este estudio se presenta este proceso como una vía de valorización de la biomasa, proceso caracterizado por un bajo consumo energético, elevada eficiencia en la formación de enlaces

carbono-carbono y facilidad para la purificación de los productos (Davda *et al.*, 2005).

La condensación aldólica se lleva a cabo, generalmente, en presencia de catalizadores básicos. Al igual que para la gran mayoría de procesos industriales, está mucho más desarrollada la catálisis homogénea, existiendo numerosa bibliografía sobre la condensación catalizada por NaOH (West *et al.*, 2008a). Con este catalizador se consiguieron selectividades de 60% para el C8 y 40% para el C13, con conversión total del reactivo. Para eliminar el catalizador de los productos se añade ácido clorhídrico hasta neutralizar la basicidad.

En cuanto a la catálisis heterogénea, se ha comprobado que los sólidos más activos para este proceso son los óxidos de alcalinos o de alcalinotérreos (Di Cosimo *et al.*, 1996), los fosfatos, los MCM41 y las hidrotalcitas (Climent *et al.*, 2004). Estudios recientes demuestran que los óxidos mixtos de metales alcalinos y alcalinotérreos o derivados de la calcinación de hidrotalcitas presentan una actividad muy elevada en fase acuosa, evitando los problemas de lixiviación obtenidos con los óxidos sencillos (Faba *et al.*, 2012). En la tabla 4 se resumen las condiciones y los resultados obtenidos en los estudios más significativos de la condensación aldólica como etapa intermedia para la obtención de biocombustibles a partir de materia lignocelulósica.

Hidrogenación/deshidratación completa para la obtención de los alcanos lineales (biodiesel)

Mediante esta última etapa, combinando reacciones de hidrogenación con deshidrataciones se obtienen alcanos

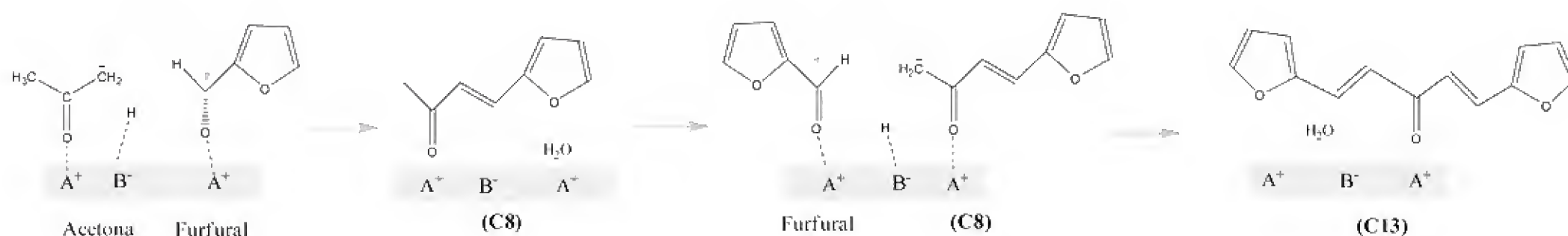


FIGURA 4. Esquema de la reacción de condensación aldólica entre acetona y furfural obteniendo los productos condensados C8 y C13. En el caso de utilizar HMF en vez de furfural como reactivo, los productos obtenidos serían los análogos C9 y C15.

TABLA 4. Condiciones de operación y resultados obtenidos en los principales estudios del proceso de condensación aldólica de furfural (FFL) o hidroximetilfurfural (HMF) y acetona (ACE).

<i>Materia prima</i>	<i>Catalizador / Disolvente</i>	<i>Temperatura de operación (°C)</i>	<i>Tiempo (h)</i>	<i>Selectividad aldehídos (%)</i>	<i>Referencia</i>
FFL:ACE (2:1)	MgO-ZrO ₂ / Agua	80	25	C8: 12; C13: 72	Barret <i>et al.</i> , 2006
FFL:ACE (7:1)	MgO-Al ₂ O ₃ / Agua	100	10	C13: 75.4	Liu <i>et al.</i> , 2010
HMF:ACE (1:1)	MgO-ZrO ₂ / Agua	120	16	C8: 43,5; C13: 56,5	Shen <i>et al.</i> , 2011
FFL:ACE (1:10)	MgO-ZrO ₂ / Agua	60	3	C8: 44; C13: 7	Sádaba <i>et al.</i> , 2011
HMF:ACE (1:1)	MgO-NaY / Agua:metanol (50%)	85	8	C8: 42,2; C13: 57,1	Huang <i>et al.</i> , 2012
FFL:ACE (1:1)	MgO-Al ₂ O ₃ / Agua MgO-ZrO ₂ / Agua CaO-ZrO ₂ / Agua	55	24	C8: 15; C13: 63 C8: 30,7; C13: 43 C8: 12,9; C13: 15,5	Faba <i>et al.</i> , 2012

lineales a partir de los aductos obtenidos anteriormente. Este proceso, ampliamente utilizado en la industria química con diferentes fines, se inserta dentro del proceso de obtención de biocombustibles como la etapa final, obteniendo los alcanos líquidos.

El hidrógeno es muy escaso molecularmente en la Tierra, por lo que se produce a nivel industrial principalmente a partir de hidrocarburos como el metano (Vollhardt y Schore, 2008). Sin embargo, al igual que en el caso de la acetona, el hidrógeno también puede obtenerse mediante procesos medioambientalmente respetuosos, de forma que la totalidad de las materias primas necesarias en la transformación de derivados de biomasa en biocombustibles tienen un origen sostenible. La principal vía para obtener hidrógeno molecular a partir de la biomasa consiste en la gasificación, proceso en el que se obtiene el H₂ como componente del gas de síntesis.

Las primeras referencias bibliográficas orientadas a este proceso introducen la posibilidad de llevar a cabo la hidrogenación en fase acuosa mediante el uso de catalizadores bifuncionales con centros activos ácidos y metálicos en un reactor de flujo de pistón (Barrett *et al.*, 2006). Estas primeras reacciones obtienen selectividades comprendidas entre 40% y 60% para los alcanos lineales de mayor orden (C13 – C15) en función de las condiciones de operación.

El mecanismo de hidrogenación de estos productos ha sido estudiado en reactores discontinuos con temperaturas entre 100 °C y 150 °C y presiones entre 2,5 y 5,2 MPa de H₂. Los resultados obtenidos muestran una mayor facilidad para la hidrogenación de los C=C acíclicos. La segunda hidrogenación implicaría la reducción del enlace C=C de los anillos de furano. Finalmente, se forma el alcohol a partir de los grupos carbonilos (C=O) presentes en las moléculas. Sobre estos alcoholes ocurre el proceso



de deshidrogenación/hidrogenación que permite la eliminación total de los oxígenos. Tras 35 horas, la hidrogenación supera 90% (West *et al.*, 2008a).

Los siguientes esfuerzos se centraron, en este ámbito, en integrar la hidrogenación en el proceso completo, desarrollando un reactor de cuatro fases que, combinando diferentes catalizadores y disolventes, obtenía los alcanos directamente de la glucosa. Para ello se utilizaron catalizadores heterogéneos como el $\text{Pt/SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Huber y Dumesic, 2006).

La dificultad técnica para desarrollar en la práctica este dispositivo, obligó a dividir el proceso en varias etapas, distinguiendo la obtención de aldehídos del resto del proceso. La introducción de disolventes orgánicos apolares para extracción (hexadecano) modificó la metodología de trabajo, pudiendo desarrollarse como una etapa las reacciones de condensación e hidrogenación, alcanzando selectividades de 85%. Para ello se desarrollaron catalizadores que combinaban los centros básicos necesarios para la condensación y los metales y ácidos necesarios para esta última fase. Las referencias más destacables desarrollaron el proceso catalizador por Pd/MgO-ZrO_2 , $\text{Pt/MgO-Al}_2\text{O}_3$, Pd/CaO-ZrO_2 o Pd/CeO_2 (West *et al.*, 2008b; Faba *et al.*, 2011).

CONCLUSIONES

La creciente concienciación medioambiental, así como la necesidad de la búsqueda de alternativas a los combustibles fósiles, ha impulsado numerosos estudios para la valorización de materia celulósica y la obtención de combustibles de segunda generación. En este artículo se hace una revisión de los pasos necesarios para la conversión de la biomasa residual, fundamentalmente la hemicelulosa, en biodiesel por medio de tratamientos químicos hidrolíticos. Se ha elegido la hemicelulosa el menor valor añadido en comparación con la celulosa, si bien los procedimientos aquí señalados serían también válidos para el tratamiento de la celulosa.

Estos tratamientos consisten en una primera etapa de hidrólisis de la biomasa, tras el pretratamiento físico o químico pertinente; una etapa de condensación aldólica para la creación de los enlaces C-C; y una última etapa de hidro-

genación/deshidratación para la obtención de los alcanos lineales que constituyen mayoritariamente el biodiesel.

Estos procesos se han comenzado a desarrollar hace no más de una década, por lo que aún están en fase de desarrollo. Aun así, son una alternativa real a los procesos petroquímicos si son establecidos globalmente en una biorrefinería. No obstante, aún queda mucho camino por recorrer, pues problemas como la poca estabilidad de los catalizadores, o las variaciones en la composición de la alimentación del proceso, suponen un importante inconveniente a su establecimiento a escala industrial.

REFERENCIAS

- Allen, S.G., L.C. Kam, A.J. Zemman y M.J. Antal. 1996. Fractionation of sugar cane with hot, compressed, liquid water. *Industrial Engineering Chemistry Research* 35(8):2709-2715.
- Asghari, F.S. y H. Yoshida. 2006. Dehydration of fructose to 5-hydroxymethylfurfural in sub-critical water over heterogeneous zirconium phosphate catalysts. *Carbohydrate Research* 341(14):2379-2387.
- Barrett, C.J., J.N. Chheda, G.W. Huber y J.A. Dumesic. 2006. Single-reactor process for sequential aldol-condensation and hydrogenation of biomass-derived compounds in water. *Applied Catalysis B: Environmental* 66(1-2):111-118.
- Bradshaw T.C., H. Alizadeh, F. Teymouri, V. Balan, B.E. Dale. 2007. Ammonia fiber expansion pretreatment and enzymatic hydrolysis on two different growth stages of Reed Canarygrass. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 137-140(1-2):395-405.
- Camacho F., P. González-Tello, E. Jurado y A. Robles. 1996. Microcrystalline-cellulose hydrolysis with concentrated sulphuric acid. *Journal of Chemistry, Technology and Biotechnology* 67:(4)350-356.
- Chang, V.S., M. Nagwani y M.T. Holtzaple. 1998. Lime pretreatment of crop residues bagasse and wheat straw. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 74(3):135-159.
- Climent, M.J., A. Corma, S. Iborra, K. Epping y A. Velty. 2004. Increasing the basicity and catalytic activity of hydro-talcites by different synthesis procedures. *Journal of Catalysis* 225(2):316-326.

- Dávalos Sotelo R. 1996. Importancia ecológica-económica del aprovechamiento de los bosques. *Madera y Bosques* 2(2):3-10.
- Davda, R.R., J.W. Shaboker, G.W. Huber, R.D. Cortright y J.A. Dumesic. 2005. A review of catalytic issues and process conditions for renewable hydrogen and alkanes by aqueous-phase reforming of oxygenated hydrocarbons over supported metal catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental* 56(1-2):171-186.
- Di Cosimo, J.I., V.K. Díez y C.R. Apesteguía. 1996. Base catalysis for the synthesis of α,β -unsaturated ketones from the vapor-phase aldol condensation of acetone. *Applied Catalysis A: General* 137(1):149-166.
- Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables.
- Faba, L., E. Díaz y S. Ordóñez. 2011. Performance of bifunctional Pd/MxNyO (M=Mg, Ca; N=Zr, Al) catalysts for aldolization-hydrogenation of furfural-acetone mixtures. *Catalysis Today* 164(1):451-456.
- Faba, L., E. Díaz y S. Ordóñez. 2012. Aqueous-phase furfural-acetone aldol condensation over basic mixed oxides. *Applied Catalysis B: Environmental* 113-114:201-211.
- Faba, L., E. Díaz y S. Ordóñez. 2013. Improvement on the catalytic performance of MgZr mixed oxides for furfural acetone aldol condensation by supporting on mesoporous carbons. *ChemSusChem* 6(3):463-473.
- Faba, L., B.T. Kusema, E.V. Murzina, A. Tokarev, N. Kumar, A. Smeds, E. Díaz, S. Ordóñez, P. Maki-Arvela, S. Willfor, T. Salmi, D.Y. Murzin. 2014. Hemicellulose hydrolysis and hydrolytic hydrogenation over proton- and metal modified beta zeolites. *Microporous and Mesoporous Materials* 189:189-199.
- Faith, W.L. 1945. Development of the Scholler process in the United States. *Industrial & Engineering Chemical Research* 37:9-11.
- Fang, Z. T. Sato, R.L. Smith, H. Inomata, K. Arai y J.A. Kozinski. 2008. Reaction chemistry and phase behavior of lignin in high-temperature and supercritical water. *Bioresource Technology* 99(9):3424-3430.
- FAO. 2008. Bosques y energía: cuestiones clave. Estudio FAO: Montes 154, Roma.
- García-Pérez M., T.T. Adams, J.W. Goodrum, D.P. Geller y K.C. Das. 2007. Production and fuel properties of Pine Chip bio-oil / Biodiesel blends. *Energy Fuels* 21(4):2363-2372.
- Gómez E.A., L.A. Ríos y J.D. Peña. 2012. Madera, un potencial material lignocelulósico para la producción de biocombustibles en Colombia. *Información Tecnológica* 23(6):73-86.
- Gómez E.A., L.A. Ríos y J.D. Peña. 2013. Efecto del Pretratamiento de Biomasa Maderera en el Rendimiento a Etanol. *Información Tecnológica* 24(5):113-122.
- Gorter H., D. Drabik y D.R. Just. 2013. Biofuel Policies and food grain commodity prices 2006-2012: All boom and no bust?. *AgBioForum* 16(1):1-13.
- Huang, X-M, T. Wang, Q.J. Liu, L. Ma y Q. Zhang. 2012. Production of jet fuel intermediates from furfural and acetone by aldol condensation over MgO/NaY. *Journal of Fuel Chemistry and Technology* 40(8):973-978.
- Huber, G.W. y J. A. Dumesic. 2006. An overview of aqueous-phase catalytic processes for production of hydrogen and alkanes in a biorefinery. *Catalysis Today* 111(1,2):119-132.
- Jackson, R.G., G.M. Foody y C.P. Quine. 2000. Characterizing wind thrown gaps from fine spatial resolution remotely sensed data. *Forest Ecology and Management* 135(1-3):253-260.
- Käldström, M., N. Kumar y D.Yu Murzin. 2011. Valorization of cellulose over metal supported mesoporous materials. *Catalysis Today* 167(1):91-95.
- Kusema, B.T., L. Faba, N. Kumar, P. Mäki-Arvela, E. Díaz, S. Ordóñez, T. Salmi y D.Yu Murzin. 2012. Hydrolytic hydrogenation of hemicellulose over metal modified mesoporous catalyst. *Catalysis Today* 196(1):26-33.
- Liu, H.H., W.J. Xu, J.H. Liu, Y. Guo, Y.L. Guo, G.Z. Lu y Y.Q. Wang. 2010. Aldol condensation of furfural and acetone on layered double hydroxides. *Kinetics and Catalysis* 51(1):75-80.
- Magrama (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente). 2011. Plan de Energías Renovables 2011-2020.
- Mäki-Arvela, P., B. Holmbom, T. Salmi y D. Yu Murzin. 2007. Recent progress in synthesis of fine and specialty chemicals from wood and other biomass by heterogeneous catalytic processes. *Catalysis Reviews: Science and Engineering* 49(3):197-340.



- Mansur, D., T. Yoshikawa, K. Norinaga, J. Hayashi, t. Tago y T. Masuda. 2013. Production of ketones from pyrolytic acid of woody biomass pyrolysis over an iron-oxide catalyst. *Fuel* 103:130-134.
- Martín, C., M. Galbe, C.F. Wahlbom, B. Hahn-Hägerdal y L.J. Jönsson. 2002. Ethanol production from enzymatic hydrolysates of sugarcane bagasse using recombinant xylose-utilising *Saccharomyces cerevisiae*. *Enzyme and Microbial Technology* 31(3):274-282.
- Mason, W.H. 1926. Process and apparatus for disintegration of wood and the like. US Patent 1,578,609.
- Mok, W.S.L. y M.J. Antal. 1992. Uncatalyzed solvolysis of whole biomass hemicellulose by hot compressed liquid water. *Industrial Engineering Chemistry Research* 31(4):1157-1161.
- Mosier, N., C. Wyman, B. Dale, R. Elander, Y.Y. Lee, M. Holtzapple y M. Landisch. 2005. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* 96(6):673-686.
- Musau, R.M y R.M. Munavu. 1987. The preparation of 5-hydroxymethyl-2-furaldehyde (HMF) from d-fructose in the presence of DMSO. *Biomass* 13(1):67-74.
- Nguyen, D.L., N. Nagasawa y T. Kume. 2000. Effect of radiation and fungal treatment on lignocelluloses and their biological activity. *Radiation Physics and Chemistry* 59(4):393-398.
- Njoku, S.I., J.A. Iversen, H. Uellendahl y B.K. Ahring. 2013. Production of ethanol from hemicellulose fraction of cocksfoot grass using *pichia stipitis*. *Sustainable Chemical Processes* 1:13.
- Obidzinski, K., R. Andriani, H. Komarudin, y A. Andrianto. 2012. Environmental and social impacts of oil palm plantations and their implications for biofuel production in Indonesia. *Ecology and Society* 17(1):25.
- Ordóñez, S., E. Díaz, M. León, L. Faba. 2011. Hydrotalcite-derived mixed oxides as catalysts for different C-C bond formation reactions from bioorganic materials. *Catalysis Today* 167(1):71-76.
- Qureshi, N. y T. Ezeji. 2008. Production of butanol (a biofuels) from agricultural residues. Part I: Use of baley straw hydrolysate. *Biofuels Bioproducts and Biorefining* 2(4):319-324.
- Rinaldi, R. y F. Schüth. 2009. Acid hydrolysis of cellulose as the entry point into biorefinery scheme. *ChemSusChem* 2(12):1096-1107.
- Román-Leshkov, Y., J.N. Chheda y J.A. Dumesic. 2006. Phase modifiers promote efficient production of hydroxymethylfurfural from fructose. *Science* 312:1933-1937.
- Root, D.F., J.F. Saeman y J.F. Harris. 1959. Chemical conversion of wood residues. Part II: Kinetics of the acid-catalyzed conversion of xylose to furfural. *Forest Products Journal* 9:158-165.
- Sádaba, I. M. Ojeda, R. Mariscal, J.L.G. Fierro y M. López-Granados. 2011. Catalytic and structural properties of co-precipitated Mg-Zr mixed oxides for furfural valorization via aqueous aldol condensation with acetone. *Applied Catalysis B: Environmental* 101(3-4):638-648.
- Sampedro, J. 2009. Los nuevos biocombustibles procederán de los desechos. Actividades T-8: Energía, http://www.pedropablomoreno.com/pedropablomoreno.com/CTM-actividades_T-8c.html
- Sánchez, Ó. y C. Cardona, 2008. Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresource Technology* 99(13):5270-5295.
- Shen, W.Q., G.A. Tompsett, K.D. Hammond, R. Xing, F. Dogan, C.P. Grey, W.C. Conner, S.M. Awerbach y G.W. Huber. 2011. Liquid phase aldol condensation reactions with MgO-ZrO₂ and shape-selective nitrogen substituted NaY. *Applied Catalysis A: General* 392(1/2):57-68.
- Shi, X., Y. Wu, H. Yi, G. Pui, P. Li, M. Yang y G. Wang. 2011. Selective preparation of furfural from xylose over sulfonic acid functionalized mesoporous Sba-15 materials. *Energies* 4(4):669-684.
- Tagliabue, M., F. Bazzano, G. Del Piero, N. Panariti y C. Perego. 2008. Hydrotreating data interpretation by chemometrics. *Catalysis Today* 137(1):119-124.
- Van de Vyer, S., J. Geboers, P.A. Jacobs y B.F. Sels. 2011. Recent advances in the catalytic conversion of cellulose. *ChemCatChem* 3(1):82-94.
- Vollhardt, K.P.C. y N. E. Schore. 2008. Química Orgánica. Estructura y Función. Ed. Omega.

- Watanabe, M. Y. Aizawa, T. Iida, r. Nishimura y H. Inomata. 2005. Catalytic glucose and fructose conversions with TiO_2 and ZrO_2 in water at 473K: relationship between reactivity and acid-base property determined by TPD measurement. *Applied Catalysis A: General* 295(2):150-156.
- West, R.M., Z.Y. Liu, M. Peter, C.A. Gartner y J.A. Dumesic. 2008a. Carbon-carbon bond formation for biomass-derived furfurals and ketones by aldol condensation in a biphasic system. *Journal of Molecular Catalysis A - Chemical* 296(1-2):18-27.
- West, R.M., Z. Y Liu, M. Peter y J.A. Dumesic. 2008b. Liquid Alkanes with targeted molecular weights from biomass-derived carbohydrates. *ChemSusChem* 1(5):417-424.
- Yang, F., Q. Liu, X. Bai y Y. Du. 2011. Conversion of biomass into 5-hydroxymethylfurfural using solid acid catalyst. *Bioresource Technology* 102(3):3424-3429.
- Yoon, H.H., Z.W. Wu y Y.Y. Lee. 1995. Ammonia-recycled percolation process for pretreatment of biomass feedstock. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 51/52(1):5-19.
- Zhang, J., B. Zhan, J. Zhang, L. Lin, s. Liu y P. Ouyang. 2010. Effect of phosphoric acid pretreatment on enzymatic hydrolysis of microcrystalline cellulose. *Biotechnology Advances* 28(5):613-619.
- Manuscrito recibido el 30 de abril de 2013.
Aceptado el 14 de julio de 2014.
- Este documento se debe citar como:
Faba, L. E. Díaz y S. Ordóñez. 2014. Transformación de biomasa en biocombustibles de segunda generación. *Madera y Bosques* 20(3):11-24.



Importancia ambiental de los agroecosistemas cafetaleros bajo sombra en la zona central montañosa del estado de Veracruz, México

Environmental importance of coffee shade agroecosystems of the mountainous central zone of Veracruz state, Mexico

Laura C. Ruelas-Monjardín^{1*}, Martha Elena Nava-Tablada¹, Juan Cervantes² y Víctor L. Barradas³

¹ El Colegio de Veracruz, Veracruz, México

² Licenciatura en Ciencias Atmosféricas, Universidad Veracruzana, Veracruz, México.

³ Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., México

* Autor para correspondencia: lruelas@colver.edu.mx

RESUMEN

El agroecosistema cafetalero bajo sombra ha contribuido a mitigar la pérdida de los servicios ambientales que provee el bosque mesófilo en la región central montañosa de Veracruz. Esto se debe en gran medida a que es un cultivo amigable con dicho ecosistema forestal. Sin embargo, a pesar de los múltiples servicios que proporciona, la cafecultura ha estado perdiendo importancia entre los productores. El objetivo de este trabajo fue identificar la percepción de los productores sobre la importancia del cultivo de café bajo sombra en la prestación de servicios ambientales y si esto influye en su disposición a conservarlo. Esta percepción se analiza en el contexto regional de cambios en la temperatura y precipitación, que podrían estar relacionados con transformaciones en la cobertura forestal. Para abordar la percepción se utilizó el método de estudio de caso. El caso se documentó con la aplicación de un cuestionario a 51 productores de la localidad de La Orduña, Coatepec, Ver., México. Para estudiar los cambios históricos de la precipitación y la temperatura regional, se utilizaron los datos de tres estaciones climatológicas cercanas a la comunidad. Los datos se analizaron con los procedimientos sugeridos por la Organización Meteorológica Mundial. Los resultados muestran cambios en el clima regional, así como la identificación de los principales beneficios ambientales de los cafetales por parte de los productores. De igual forma, muestran su disposición a mantener dicho cultivo, siempre que las políticas gubernamentales retribuyan económicamente los servicios ambientales que proporciona este agroecosistema.

PALABRAS CLAVE: deforestación, estudio de caso, percepción ambiental, precipitación, servicios ambientales forestales, temperatura.

ABSTRACT

The shade-grown coffee agroecosystem has contributed to mitigate the loss of ecosystem services provided by the tropical cloud forest in the mountainous central region of Veracruz. This is largely due to the fact that this cultivation type is friendly with that forest ecosystem. Although, despite the multiple services that this cultivation provides, coffee production has been losing importance among producers. The objective of this research was to identify the farmers' perception about the importance of growing coffee under shade in the provision of environmental services and whether this influences their willingness to maintain this agroecosystem. This perception is analyzed in the context of regional changes in temperature and precipitation, which could be related to transformations in forest cover. In order to address the perceptions a case study method was employed. The case study was carried out by analyzing the results of a questionnaire administered to 51 producers of the locality of La Orduña, Coatepec, Ver. In order to study the historical changes in regional precipitation and temperature, data from three climatic stations close to La Orduña were employed. Data were analyzed with the procedures recommended by the World Meteorological Organization. Results display changes in regional climate, as well as the producers' identification of the main environmental benefits that shade-grown coffee provide. Similarly, they show their willingness to maintain this culture, providing government policies financially remunerate the environmental services that this agroecosystem supply.

KEY WORDS: deforestation, environmental perceptions, precipitation, forest environmental services, temperature.

INTRODUCCIÓN

Las áreas boscosas desaparecen, principalmente por la apertura de tierras para la agricultura, a una velocidad alarmante de 13 millones de hectáreas cada año (FAO, 2007). Aunque cifras más recientes de esta organización (FAO, 2010b, citado por FAO, 2012), señalan que la deforestación en la última década ha descendido a $5,2 \times 10^6$ ha de pérdida de bosques en promedio anual neto, este ritmo de deforestación sigue siendo alarmante. Sin embargo, la deforestación de los bosques tropicales y templados se ha invertido. Hasta la década de 1950, la deforestación que habían venido experimentando los bosques templados prácticamente había cesado. En cambio, la deforestación de los bosques tropicales aumenta sensiblemente a partir de la década de 1950, y se mantiene alta (FAO, 2010, citado por FAO, 2012). Para México, esta organización publica una tendencia decreciente en la superficie forestal de bosques y selvas, que pasó de 69 016 ha en 1990 a 64 238 ha en 2005. De ahí que el país ocupe el doceavo lugar entre las naciones con mayor tasa de deforestación, dado que la superficie que anualmente pierde la cubierta forestal aumentó de 2600 km²/año a 3480, en el periodo de 1990 a 2005, respectivamente (Conafor, 2006; FAO, 2007). El estado de Veracruz no es la excepción, ya que tuvo una alta tasa de deforestación entre 1984 y 2000. Esto ha tenido como consecuencia que 40% del territorio estatal presente erosión grave por falta de cobertura vegetal (García-López, 2009). En el caso específico de la región montañosa central del estado, particularmente en el Cofre de Perote, se registran tasas de deforestación de 2 km²/año, que han tenido como consecuencia una drástica reducción del bosque (se conserva 56,8% del área original). El bosque ha sido sustituido principalmente por agricultura (27%) y pastizales inducidos y cultivados (15%) (García-Romero *et al.*, 2010). Este fenómeno ocurre a pesar de la reconocida importancia ambiental que tienen los bosques en general, y los bosques de montaña en particular, debido a los recursos y servicios ambientales de suministro, regulación, mantenimiento y culturales que brindan; tales como: regulación del ciclo hidrológico y del clima;

conservación de la biodiversidad; potencial de captura de carbono; protección de los suelos ante la erosión; suministro de leña, madera para la construcción y productos no maderables, así como valores paisajísticos y de recreación (Moreno y Verdú, 2007; Semarnat, 2013).

Específicamente en lo que se refiere al papel de la vegetación en la regulación del clima de una región, el tema es controversial. Sin embargo, en los últimos años se ha demostrado que el clima y la vegetación coexisten en un equilibrio dinámico, que puede ser alterado por perturbaciones en cualquiera de los dos componentes (Shukla *et al.*, 1990; Barradas *et al.*, 2010). Por ejemplo, la presencia de la vegetación atenúa la temperatura del aire mediante el mecanismo de evapotranspiración (Barradas y Fanjul, 1986), mientras que la temperatura del suelo por radiación solar se incrementa debido a la pérdida del estrato vegetal (Hartmann, 1994).

En la región central montañosa de Veracruz, el ecosistema predominante es el bosque mesófilo de montaña, conocido también como bosque de niebla, que tiene gran importancia ecológica por su gran biodiversidad y especies endémicas, pues incluye 2500 especies de plantas que crecen preferente o exclusivamente en este tipo de ecosistema. La forma biológica más diversa son las plantas epífitas (orquídeas, tenchos, helechos y musgos), que representan 32% de las especies vegetales, los árboles representan 18%, mientras los arbustos, hierbas y bejucos constituyen el resto. El bosque de niebla está conformado por una mezcla de árboles de origen templado y tropical entre los que destacan el liquidámbar (*Liquidambar styraciflua*), el encino (*Quercus spp.*), la marangola (*Clethra mexicana*) y la magnolia (*Magnolia schiedeana*). Además, alberga una alta cantidad de especies endémicas de reptiles (102 especies), anfibios (100 especies), aves (201 especies) y mamíferos (46 especies) (Williams-Linera, 2007).

En dicha región uno de los principales cultivos es el café bajo sombra, cuyo sistema productivo se considera “amigable con el ambiente” dado que ayuda a conservar la vegetación y fauna del bosque mesófilo de montaña (Manson *et al.*, 2008). El sistema tradicional de produc-



ción de café bajo sombra ha sido abordado por diversas investigaciones (Moguel y Toledo, 2004; Anta, 2006) que subrayan los elementos sustentables del mismo y los diferentes servicios ambientales que proporciona, tales como: captura de carbono, protección del suelo, recarga de los mantos acuíferos, valor paisajístico, entre otros. Los estudios de tipo ambiental han puesto de manifiesto la importancia de los árboles de sombra asociados al cafetal en la estabilidad de ese agroecosistema, así como su papel en la captura de carbono (Pineda-López *et al.*, 2005) y como hábitat de una alta biodiversidad (Contreras-Hernández, 2010). La sombra de los cafetales, compuesta en su mayoría por otros árboles (*Inga jinicuil* y/o *Inga leptoloba*) y arbustos (naranja, guayaba, plátano) contribuyen a mantener la fertilidad del suelo, reduciendo la erosión y aportando una buena cantidad de materia orgánica producida por la hojarasca (Jiménez-Ávila y Gómez-Pompa, 1982) y fijando nitrógeno atmosférico (Roskoski, 1982).

En este mismo sentido Hernández-Solabac *et al.* (2011) mencionan que los cafetales bajo sombra de la zona centro de Veracruz imitan la estructura del bosque natural que predomina en la región, siendo las especies más utilizadas para sombra: chalahuite (*Inga* sp.), plátano (*Musa* spp.), naranjo (*Citrus sinensis* L. Osbeck), duela (*Schizolobium parahybum* Vell.), copalillo (*Protium copal* Schlecht & Cham.), ixpepe (*Trema micrantha* L. Blume) y mango (*Mangifera indica*). Existen estudios en la zona montañosa del centro de Veracruz (Del Ángel *et al.*, 2006; Hernández-Solabac *et al.*, 2011; Nava-Tablada y Martínez-Camarillo, 2012) que señalan el gran impacto ambiental asociado al cambio del cultivo de café bajo sombra por monocultivos comerciales, sobre todo huertos frutales y plantaciones de caña de azúcar. Dichos autores destacan la gran influencia que ejerce la percepción sociocultural y económica de los productores en la decisión de realizar tales cambios de sistema productivo.

Respecto a la contribución específica de los cafetales de sombra en la regulación del clima regional, Barradas *et al.* (2010) plantean que el aumento en la temperatura y la disminución de la precipitación que se da por la sustitución de bosques, se ha visto moderado por la presencia de

grandes áreas de café bajo sombra. Razón por la cual, su conservación es de gran importancia ambiental en la región central de Veracruz. Además, la presencia de nieblas, alta humedad del aire y temperatura templada, son parámetros importantes en el bosque mesófilo de montaña (donde generalmente se cultivan los cafetales bajo sombra). Estos parámetros contribuyen a mantener un ambiente húmedo permanente, que favorece la presencia de epifitas (musgos, líquenes, orquídeas), las cuales contribuyen a su vez a conservar dicho microclima, aún cuando a nivel macroclimático la humedad relativa haya disminuido (Stadtmüller, 1987). Barradas y Fanjul (1984) agregan que cuando se transforma el agroecosistema cafetalero (pluricultivo) a un agrosistema (monocultivo) como caña de azúcar, se observa un aumento de la temperatura, tanto del aire como del suelo y por ello una reducción de la humedad en ambos, que conlleva a un aumento drástico de la evapotranspiración. El cambio de este concierto de variables y mecanismos puede afectar potencialmente no solo al cultivo de café, sino a todas las especies animales y vegetales que habitan este agroecosistema.

Finalmente, resulta relevante mencionar que la actividad cafetalera nacional se concentra en los estados de Chiapas, Veracruz, Puebla y Oaxaca, con un predominio de pequeños productores con cafetales bajo sombra. Veracruz ocupa el segundo lugar en producción de café en el país y la producción de las regiones de Córdoba y Coatepec (situadas en la región central montañosa del estado) son reconocidas en el mercado internacional por su calidad, producto del clima y suelo óptimos (Mestries, 2006). Sin embargo, el sector cafetalero nacional enfrenta desde 1998 una crisis relacionada con la caída de los precios en el mercado internacional (García *et al.*, 2006). Esta crisis ha repercutido negativamente en las regiones cafetaleras mexicanas, donde actualmente se observan problemas como: aumento de la migración, abandono de las plantaciones, severo impacto ambiental por la tala de cafetales para cambio de cultivo o urbanización, alta incidencia de plagas y enfermedades que afectan la calidad del grano, bajos rendimientos y drástica caída del nivel de vida de los pobladores rurales que

dependen de la cafecultura (Aragón, 2006). Todo ello pone en riesgo la conservación del agroecosistema de café bajo sombra que como se ha mostrado presenta una muy importante función ambiental.

Dado que la relación socio-ambiental, entre productores y el ecosistema cafetalero no ocurre de manera automática, sino por visiones personales de los actores locales hacia situaciones particulares, es necesario identificar las percepciones que se dan en términos de las visiones (Haas, 1992). Además, es importante entender la percepción de los actores sobre la degradación ambiental porque entre otras cosas: 1) permite fungir como un indicador útil y objetivo de degradación ambiental (cuando no hay otros datos disponibles), 2) influye en la participación de los actores locales en programas y políticas dirigidas a mejorar las condiciones ambientales, y 3) influye en los comportamientos ambientales individuales (Barber *et al.*, 2003).

Las percepciones se plasman en símbolos, significados, subjetividad e intencionalidades que a su vez se materializan en la palabra, por lo que es recomendable estudiarlas desde un enfoque cualitativo. En la investigación con contenido cualitativo, se identifican las experiencias y percepciones de los actores, junto con el sentido que le dan a sus acciones, los significados que ellos mismos atribuyen a sus actos, incluyendo relaciones y mecanismos profundos, conscientes o no, que desencadenan el hacer individual en un contexto social (Padlog, 2009).

Por lo anterior, esta investigación se formuló acorde con los objetivos siguientes.

OBJETIVO

El objetivo general fue identificar la percepción de los productores sobre la importancia del cultivo de café bajo sombra en la prestación de servicios ambientales (incluida la regulación del microclima) y si esto influye en su disposición a conservar dicho cultivo. Esta percepción se analiza en el contexto regional de cambios en la temperatura y precipitación, que podrían estar relacionados con los cambios en la cobertura forestal, pero que no son objeto de prueba en esta investigación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el presente estudio se utilizó el método de estudio de caso, por la naturaleza cualitativa de la investigación, por su orientación a atender preguntas relacionadas con el por qué y cómo y debido a qué se enfoca al análisis de un fenómeno contemporáneo dentro de un contexto de la vida real (Yin, 2009). Las percepciones, por su naturaleza subjetiva de interpretación particular de la realidad donde se encuentran insertados los actores, solo pueden entenderse dentro del contexto que las rodea y que por ende las influye. Además, la amenaza persistente sobre el agroecosistema de café bajo sombra, no se puede comprender sin la interpretación del pasado. Esto es, la pérdida del café bajo sombra no está desligado de las acciones políticas que en el pasado fueron implementadas, en detrimento de esta actividad.

Como estudio de caso se seleccionó a la localidad de La Orduña, municipio de Coatepec, Veracruz, por existir un creciente proceso de sustitución de cafetales bajo sombra por monocultivos o por el avance de la mancha urbana. Esta localidad se ubica en la zona central montañosa del estado de Veracruz, México (Fig. 1) a 96° 56' 07" O, 19° 27' 11" N y 1165 m snm (INEGI, 2011). Hidrológicamente se encuentra en la microcuenca del Río Pixquiac, que juega un papel muy importante en la captación de agua para las poblaciones de la región (Martínez, 2011). El clima es semicálido húmedo con lluvias todo el año, registrándose en el ámbito municipal una precipitación pluvial que varía entre 1500 mm y 2000 mm anuales (Martínez, 2011). El ecosistema predominante son remanentes del bosque mesófilo de montaña, conocido también como bosque de niebla, que tiene gran importancia ecológica por su gran biodiversidad y especies endémicas (Williams-Linera, 2007), vegetación que actualmente se encuentra mezclada con plantaciones de café bajo sombra.

La Orduña cuenta con una población de 1588 habitantes, por lo que se clasifica como localidad rural (menor de 2500 habitantes) (INEGI, 2011). La historia del poblado está relacionada con la hacienda del mismo nombre, que durante la época colonial fue una de las más importantes productoras de caña de azúcar en la región y poseía un



ingenio conocido como La Orduña o San Pedro Buenavista. Posteriormente se transforma en hacienda cafetalera y también tuvo huertos de cítricos (Winfield, 2010). Actualmente los principales cultivos en la región son el café bajo sombra y la caña de azúcar, pues aunque ya no existe el ingenio mencionado, la localidad y sus terrenos de cultivo se encuentran cerca del ingenio Mahuixtlán, situado en el municipio de Coatepec.

La cercanía de esta localidad, con zonas metropolitanas como las que conforman Xalapa y Coatepec, muy probablemente ha influido en el avance de fraccionamientos urbanos en áreas anteriormente dedicadas a la producción cafetalera (Martínez, 2011).

Para informar el caso se diseñó un cuestionario con preguntas abiertas y cerradas. El cuestionario se dividió en tres secciones. En la primera sección se incluyeron

preguntas generales para identificar la posición del entrevistado en términos de poder entender de manera muy general, el contexto en el que se inserta. Se refiere de manera explícita a la escolaridad, sexo, edad y la importancia que para él tiene el cultivo de café, en términos de su actividad productiva. En la segunda sección se incluyeron preguntas sobre el cultivo del café, en términos de superficie, sistema de cultivo, amenazas que penden sobre el cultivo e incentivos para mantener el cafetal. En la tercera sección se indagó su percepción sobre los servicios ecosistémicos de regulación, suministro y de tipo cultural, que presta el café. Para recolectar los datos se aplicó un cuestionario cuyo objetivo fue identificar la percepción de los productores sobre la importancia del cultivo de café bajo sombra en la prestación de servicios ambientales y si este conocimiento influye en la conservación de dichos agroecosistemas, todo ello con

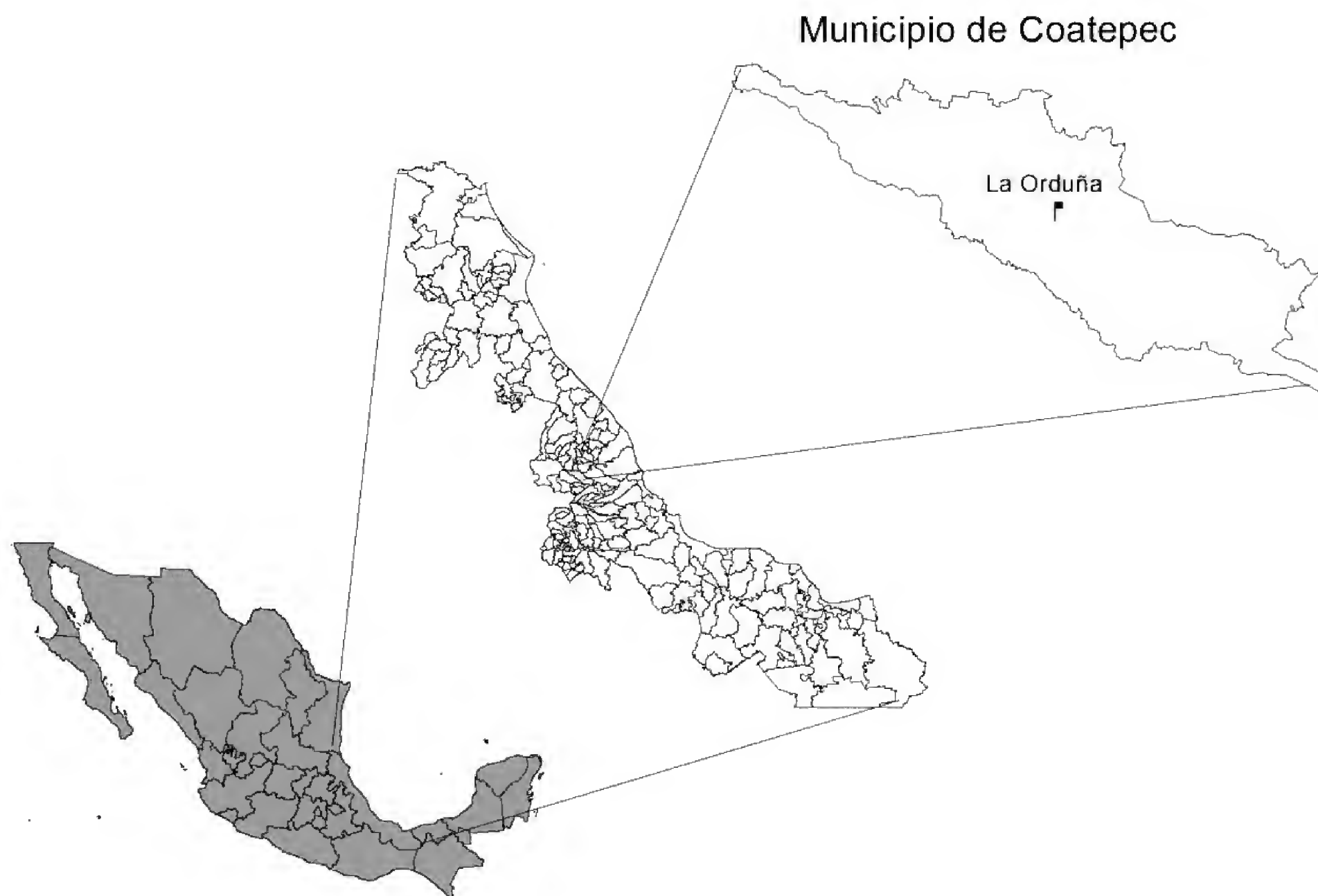


FIGURA 1. Localización de la Orduña, municipio de Coatepec, Ver., México.

el fin de vislumbrar tendencias futuras en el cambio de uso del suelo y su posible impacto ambiental, basándose en el trabajo de Barradas *et al.* (2010).

El cuestionario se administró mediante entrevistas cara a cara a 51 productores seleccionados al azar, siendo 30% de los registrados en el padrón de productores de café del municipio de Coatepec, elaborado por el extinto Instituto Veracruzano para el Desarrollo Rural.

Con el fin de contextualizar la percepción de los productores, se analizaron con datos climáticos verificables, los cambios históricos de la precipitación y la temperatura registrados en tres estaciones meteorológicas de la zona de estudio: Briones (19° 25' 41" N, 97° 05' 25" O, 2100 m snm) en el municipio de Coatepec, Oxtlapa (19° 27' N, 97° 06' O, 2500 m snm) en el municipio de Xico y Teocelo (19° 23' N, 96° 58' O, 1160 m snm) en el municipio del mismo nombre.

Para determinar los cambios históricos de la precipitación y la temperatura se realizó un análisis estadístico siguiendo los procedimientos sugeridos por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la cual ha venido impulsando el uso de índices de cambio climático regional a partir de datos diarios (Peterson, 2005). Con base en ello se analizaron las series diarias de precipitación y temperatura de las estaciones climatológicas convencionales localizadas en la microrregión de estudio. Para el caso de Briones se analizaron las series de precipitación y temperatura diarias comprendidas de 1985 a 2008, para Oxtlapa de 1985 a 2008 y para Teocelo de 1948 a 2008.

El primer paso del análisis consistió en aplicar a las series de datos el módulo RHtestV2 del software RClimdex, para probar la homogeneidad de los mismos, esto es, que los datos provengan de la misma muestra (Peterson, 2005).

Puesto que las series presentaron inhomogeneidades ("saltos" de la media), estas se corrigieron en el mismo módulo RHtestV2 mediante un modelo de regresión de dos fases, donde se considera que los datos de los últimos años son confiables. Mediante el modelo de regresión se van ajustando las inhomogeneidades de los datos anteriores. Este procedimiento se basa en que una serie climática de datos se dice homogénea si sus fluctuaciones son causa-

das por variaciones climáticas, o bien si es representativa del clima en los alrededores del punto de observación. Mientras que la inhomogeneidad está definida como los puntos de cambio en la serie climática que pueden deberse a cambios de emplazamiento de la estación climatológica, cambio de sensores o de métodos de observación y cambios del entorno del observatorio (cambios del uso del suelo, crecimiento urbano, etc.) (Vincent, 1998).

Una vez obtenidas las series ajustadas, el mismo software RClimdex ajusta una recta de regresión que indica la tendencia y intensidad del cambio de la precipitación. Es importante señalar que estadísticamente es conveniente conocer si la recta ajustada es significativa o no; sin embargo, esto no se realizó para fines del presente análisis.

RESULTADOS

Percepción de los productores sobre la importancia ambiental de los cafetales bajo sombra

En las características generales de los productores de café entrevistados, se tiene que 61% son hombres, 75% se encuentra en el estrato etario que va de 50 a 89 años (lo cual refleja el "envejecimiento" de la población ocupada en este sector productivo) y 69% solamente cuenta con un nivel de escolaridad básica (primaria). Sesenta y cinco por ciento de los entrevistados se dedica exclusivamente al cultivo del café y solo 35% realizan otras actividades complementarias (labores del hogar, pequeño comercio y trabajo asalariado como obreros).

Mientras que las parcelas de café se caracterizan por ser minifundios (todas tienen una superficie menor a 3 ha), generalmente heredados como propiedad familiar. El sistema de producción de café practicado en todos los predios es bajo sombra. Los productores entrevistados poseen gran experiencia en la cafecultura ya que 80% declara tener más de 10 años dedicándose a esta actividad, existiendo incluso cafecultores (6%) que mencionan más de 50 años. Es decir, la mayoría ha pasado gran parte de su vida produciendo café, dado que desde niños se incorporaron al trabajo agrícola para ayudar a sus padres.



En lo relativo a la sustitución de los cafetales por otros usos del suelo, las cifras resultan alarmantes, pues 84% de los entrevistados calcula que ha desaparecido más de 40% de los cafetales existentes en la comunidad (incluso 39% de los entrevistados considera que esta pérdida alcanza más de 70% de los cafetales que existían cuando eran niños). Noventa y seis por ciento de los entrevistados considera que el cultivo de café ha sido sustituido por la caña de azúcar y/o la construcción de casas habitación.

Cuando se preguntó sobre las principales causas de la sustitución de los cafetales por otros cultivos o usos del suelo, 82,4% de los productores reconoció que la baja en el precio del café es lo que más ha influido para tomar tal decisión, mientras 11,8% mencionó la falta de apoyo a la cafecultura por parte de las instituciones gubernamentales que operan en el sector agropecuario.

También se cuestionó a los productores respecto a si mantendrían sus cafetales en caso de que existieran pagos por servicios ambientales que los incentivarán, 78,5% respondió afirmativamente, agregando que dichos apoyos servirían para costear las diferentes actividades productivas que implica el cultivo del café. Por su parte, 13,7% se mostró indeciso, dado que anteriormente les han prometido otros tipos de apoyo económico que nunca se entregan, se otorgan condicionados o en monto menor al comprometido, por lo que consideran que en el caso de pago por servicios ambientales resultará igual. Es importante señalar que 7,8% de los entrevistados respondió que no conservaría su cafetal aún y cuando se le ofrecieran estos apoyos, dado que tienen pensado vender las parcelas a corto o mediano plazo, pues ya no resulta económicamente redituable la producción de café.

En lo relativo a la percepción de los beneficios ambientales que proporcionan los cafetales bajo sombra, 96% mencionó que el cafetal les suministra otros productos, principalmente comestibles (plátano, naranja, jinicuil, flor de izote) y leña. Ambos los utilizan para consumo familiar o venta a pequeña escala para obtener algún ingreso extra.

Otros servicios ambientales de los cafetales identificados por los entrevistados en orden de importancia fue-

ron los siguientes: en primer lugar la regulación del clima (ayudan a mantener un clima más fresco y húmedo); en segundo término la mejora de la calidad del aire; en tercer puesto el control de la erosión del suelo; y en cuarto lugar la captación de agua. Como puede observarse los productores perciben claramente una relación directa entre la conservación de los cafetales y la regulación del clima.

En cuanto al valor paisajístico y cultural de los cafetales, la mayoría de los encuestados encuentra la zona cafetalera muy atractiva, lo cual los motiva a conservarla y mantenerla. Además reconocen que el cultivo del café es parte de la cultura e identidad regional y constituye una tradición familiar que ha sido heredada generacionalmente. Es decir, el agroecosistema cafetalero tiene un alto valor estético y cultural para los habitantes de La Orduña y sus alrededores. Además, también es apreciado como un sitio que les proporciona posibilidades de recreación y desarrollo de actividades turísticas.

Variación histórica de la precipitación y la temperatura en la región de estudio

Con el objetivo de contextualizar la percepción de los productores respecto a que los cafetales ayudan a la regulación del clima, se analizó la tendencia histórica de temperatura y precipitación en la región.

En primer lugar se presenta el análisis estadístico realizado con los procedimientos sugeridos por la OMM a las series de precipitación diaria de las estaciones climatológicas convencionales de Briones, Oxtlapa y Teocelo, para identificar la tendencia histórica de esta variable climática en la microrregión.

En la figura 2 se muestra que la precipitación en Briones ha aumentado con una intensidad de 4,8 mm/año. Mientras que en la figura 3 se observa el incremento en los días en que se registran 20 mm o más de precipitación (presencia de chubascos o lluvias intensas).

La figura 4 muestra la tendencia de la precipitación en Teocelo, donde se observa una disminución de 1,7 mm/año. En la figura 5 también se identifica una disminución de los días que registran 20 mm o más de precipitación.

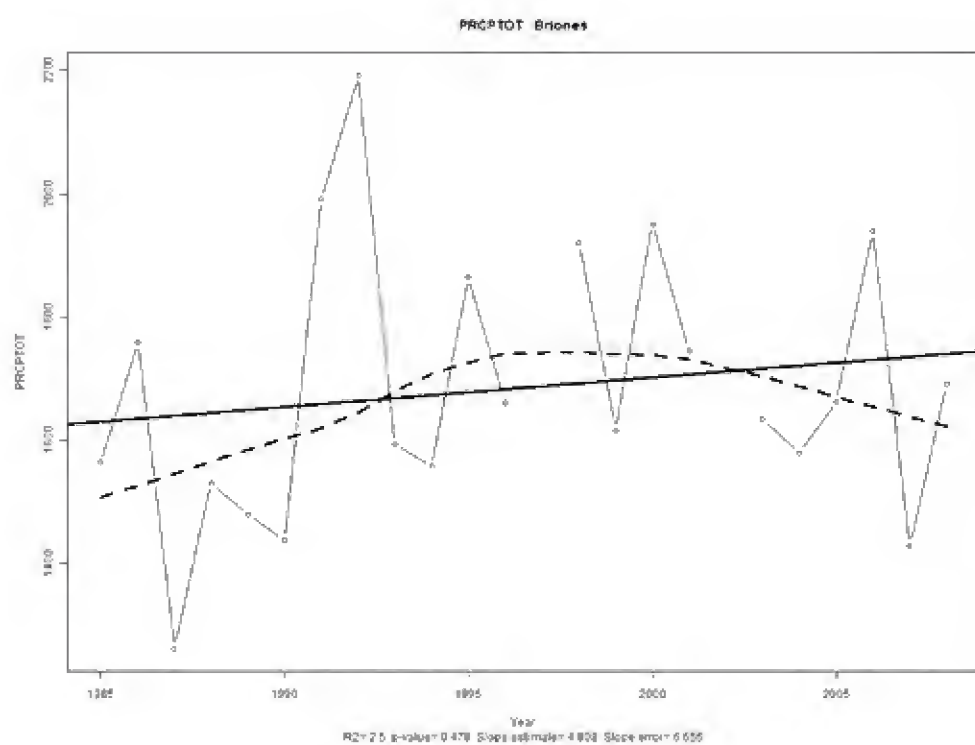


FIGURA 2. Serie de precipitación total anual ajustada y su tendencia en el periodo de 1985 a 2008 en Briones, Veracruz.

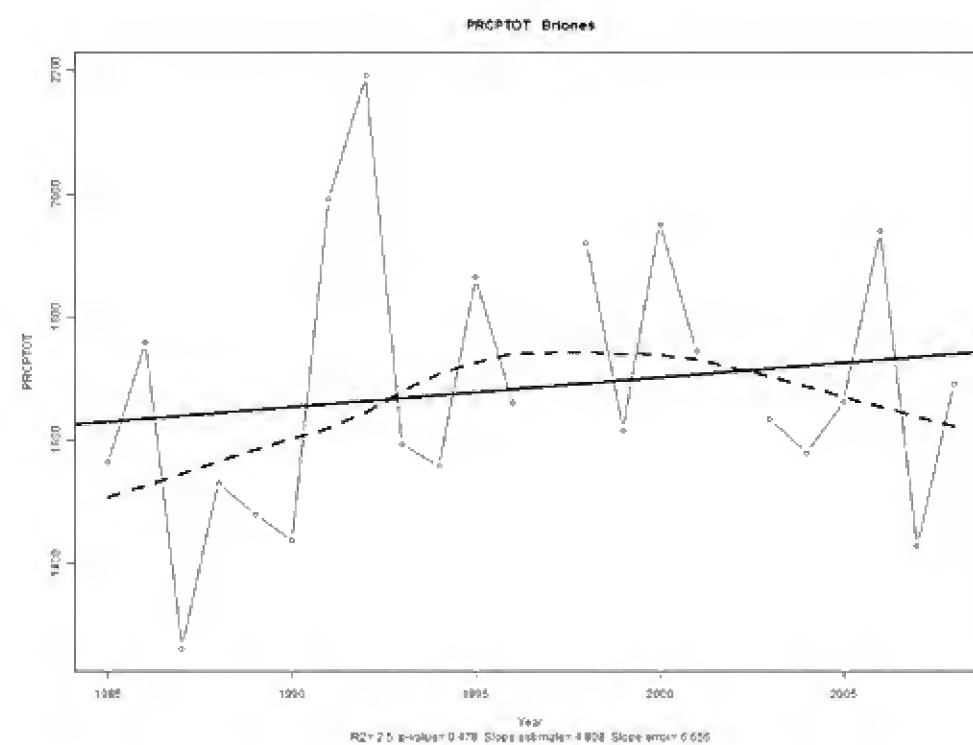


FIGURA 3. Serie de días con precipitación igual o mayor a 20 mm y su tendencia en el periodo de 1985 a 2008 en Briones, Veracruz.

La figura 6 corresponde a la precipitación de Oxtlapa, donde se manifiesta igualmente una disminución intensa de la precipitación. Puesto que la serie de este lugar es muy corta, no se realizó el análisis de los días con precipitación igual o mayor a 20 mm al día.

Comparando los resultados de las tres estaciones climatológicas convencionales, se observa que si bien en Briones la tendencia es al aumento, la cantidad anual de precipitación en este sitio (1600 mm anuales) es menor a la de Teocelo (2000 mm anuales) y mucho menor con relación a Oxtlapa (3000 mm anuales).

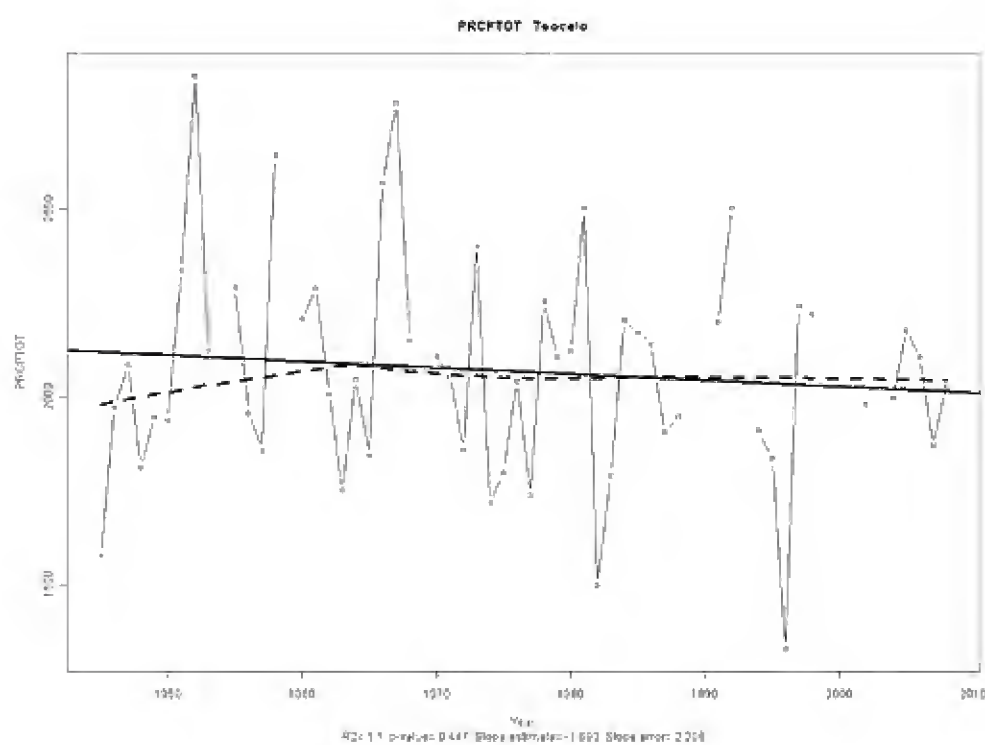


FIGURA 4. Serie de la precipitación total anual ajustada y su tendencia en el periodo de 1948 a 2008 en Teocelo, Veracruz.

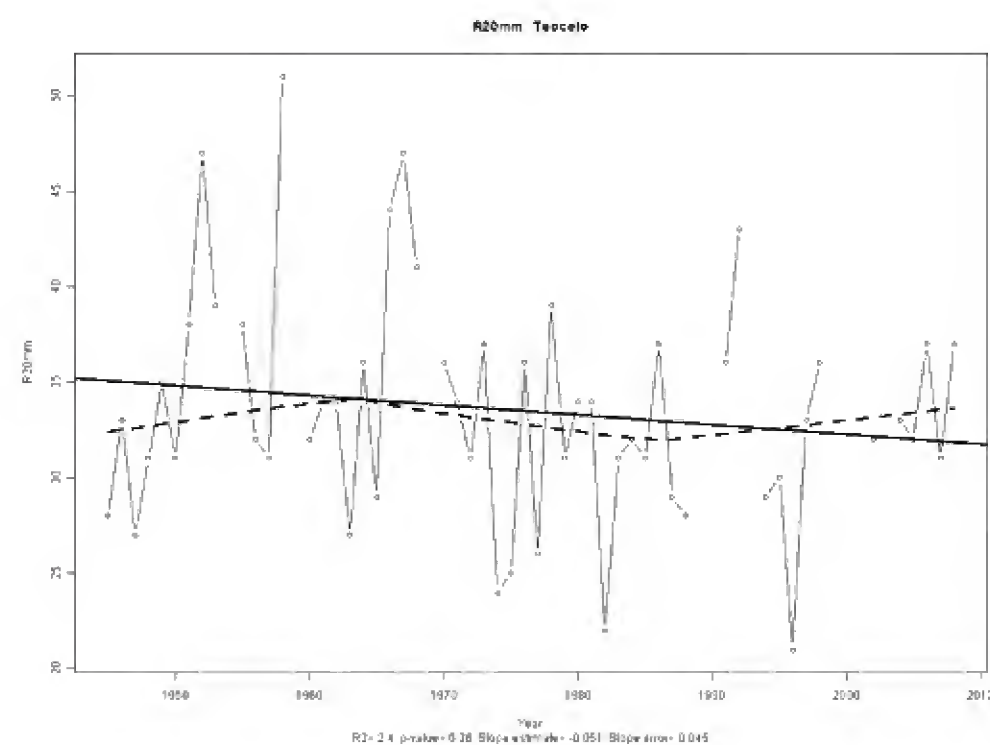


Figura 5. Serie de días con precipitación igual o mayor a 20 mm y su tendencia en el periodo de 1948 a 2008 en Teocelo, Veracruz.

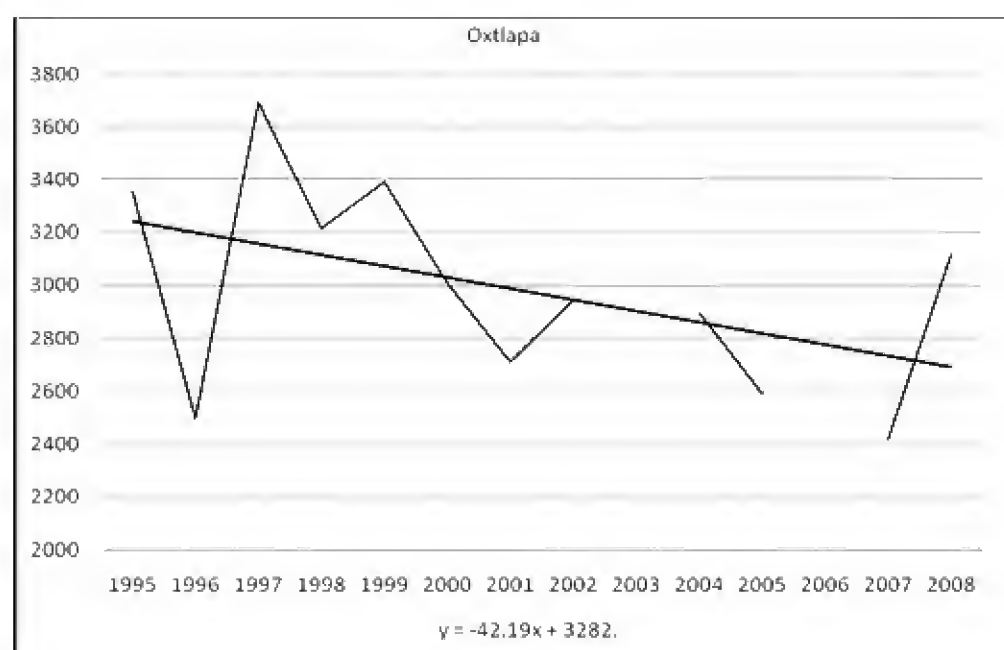


FIGURA 6. Serie de la precipitación total anual ajustada y su tendencia en el periodo de 1995 a 2008 en Oxtlapa, Veracruz.

En resumen, la tendencia de la precipitación regional registrada en las estaciones climatológicas estudiadas es hacia el incremento de los eventos de lluvias torrenciales (Briones) y la disminución de la precipitación anual (Teocelo y Oxtlapa).

La variación histórica de la temperatura en la estación climatológica de Briones (Fig. 7), a pesar de la discontinuidad de la información, con base en el análisis de tendencia de temperatura promedio anual (máxima, media y mínima) se presenta una disminución tanto en la máxima como en la mínima y la media. La temperatura

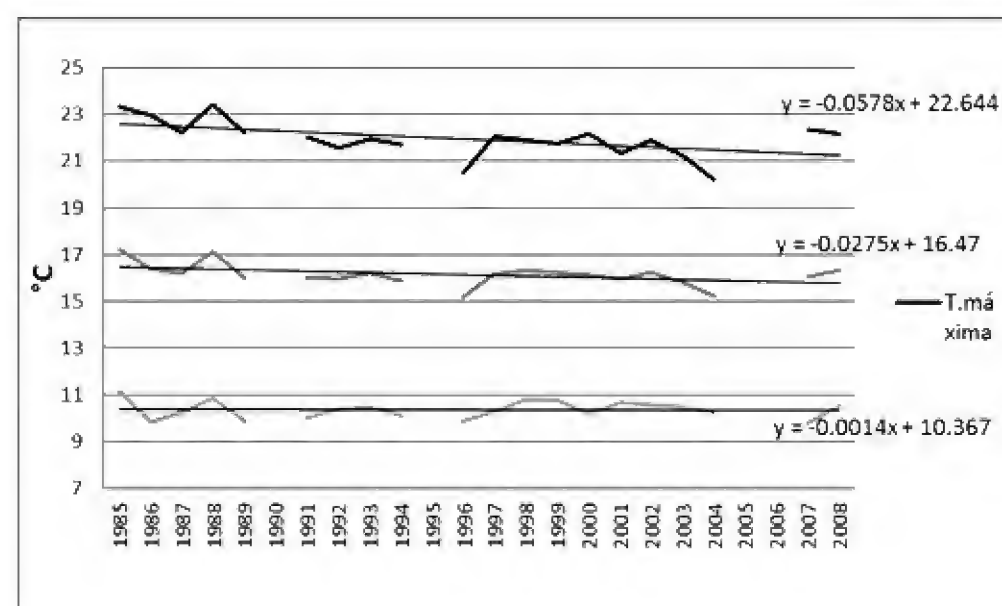


FIGURA 7. Tendencia de la temperatura promedio anual máxima, media y mínima en el periodo de 1985 a 2008 en Briones, Veracruz.

máxima exhibe el mayor cambio ($-0,057\text{ }^{\circ}\text{C/año}$) y la mínima el menor ($-0,0014\text{ }^{\circ}\text{C/año}$).

Oxtlapa muestra una tendencia al aumento de la temperatura máxima y media (Fig. 8). La temperatura máxima muestra el mayor cambio ($0,016\text{ }^{\circ}\text{C/año}$), mientras que la mínima muestra una tendencia negativa, aunque con un valor de cambio muy bajo ($-0,0016\text{ }^{\circ}\text{C/año}$). Esta diferencia entre la máxima y la mínima tiende a ser mayor al transcurso del tiempo, indicando que la temperatura en este sitio se está volviendo más “extremosa”.

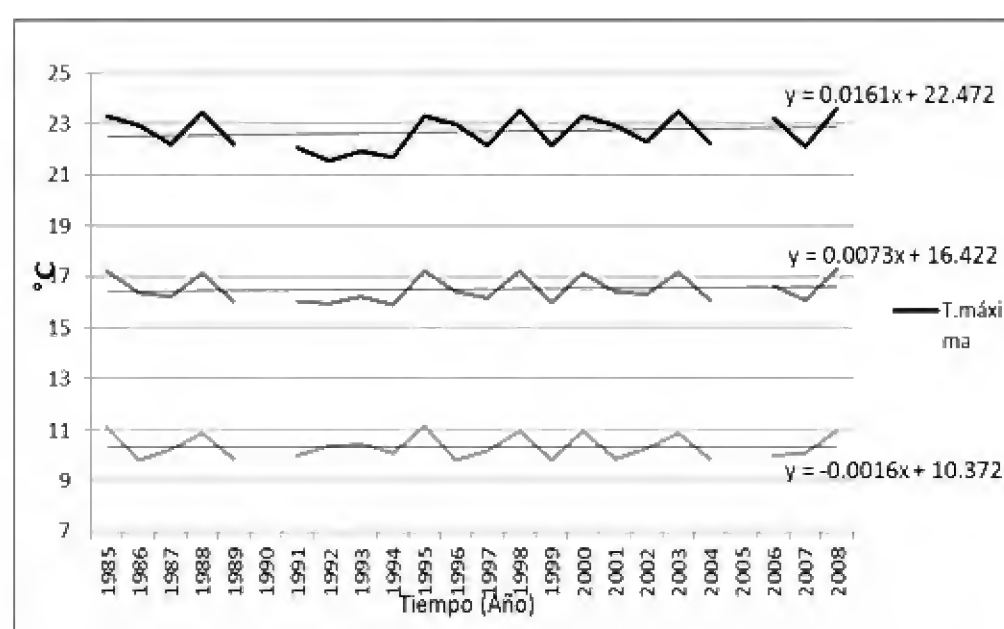


FIGURA 8. Tendencia de la temperatura promedio anual máxima, media y mínima en el periodo de 1985 a 2008 en Oxtlapa, Veracruz.

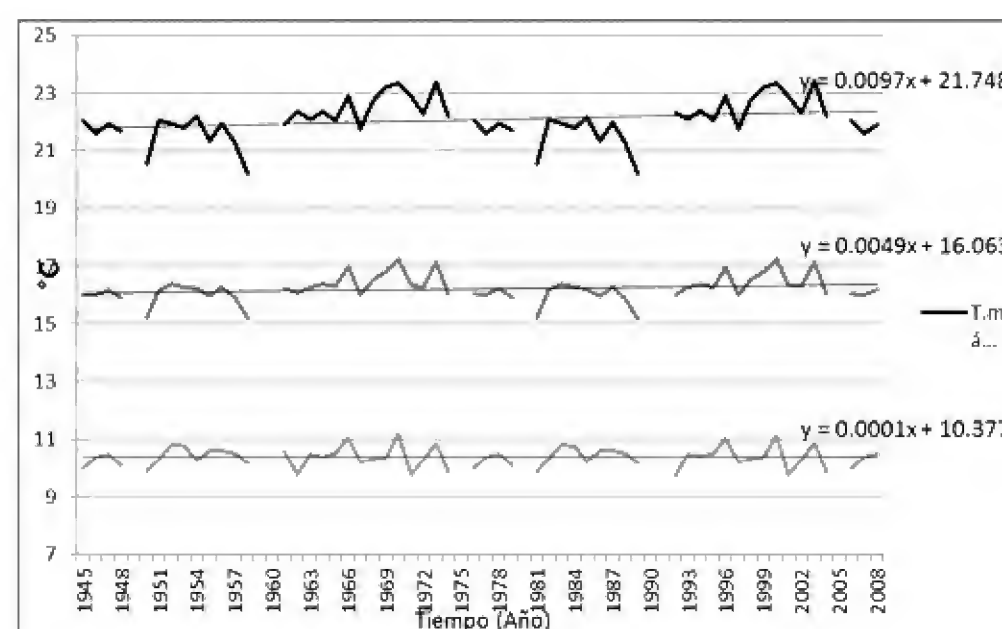


FIGURA 9. Tendencia de la temperatura promedio anual máxima, media y mínima en el periodo de 1985 a 2008 en Teocelo, Veracruz.

Para Teocelo (Fig. 9), aunque la temperatura muestra una tendencia al aumento, en el caso de la mínima el valor es muy cercano al cero. La temperatura máxima muestra el mayor aumento (0,0097 °C/año), teniendo en Teocelo un caso similar al de Oxtlapa, donde la tendencia de la temperatura es un incremento de la máxima y un decremento de la mínima.

En resumen, dos de las estaciones climatológicas (Oxtlapa y Teocelo) muestran una tendencia al incremento de la distancia entre la temperatura máxima y mínima que se refleja en un clima más extremoso. Mientras que en Briones se observa un decremento, lo cual pudiera estar relacionado con el aumento de la precipitación en la zona (Fig. 2).

DISCUSIÓN

El clima en la región central montañosa del estado de Veracruz donde se encuentra la región de estudio es el resultado de una interacción compleja de los sistemas sinópticos que predominan (sistemas tropicales en verano y desplazamiento de masas de aire polar y frentes asociados de latitudes medias en invierno) por el desplazamiento norte-sur-norte del anticiclón de Las Azores-Bermudas, de la topografía-orografía, de la interacción planta-atmósfera y de la gran cercanía al litoral del Golfo de México. La región también ha estado sujeta desde finales del siglo XIX a un cambio sistemático y extensivo del uso del suelo, que ha reducido drásticamente la vegetación original para convertirla a actividades productivas principalmente agropecuarias (García-Romero *et al.*, 2010). Todo ello torna compleja la detección de cambios climáticos a nivel microregional y su relación con la conservación del bosque y cafetales bajo sombra, tanto desde la perspectiva de los productores locales como a partir de los datos de las estaciones meteorológicas existentes en el área abordada.

Las tendencias de la temperatura y la precipitación registradas en la zona de estudio, en general concuerdan con los resultados de algunas investigaciones climáticas realizadas en esta región (Barradas y Fanjul, 1986; Barradas *et al.*, 2004; Barradas, *et al.*, 2010), las cuales han detectado que la precipitación pluvial en general ha disminuido al igual que la frecuencia de la niebla, mientras que

las temperaturas en algunos casos disminuyen o se han vuelto extremas. Por otro lado, en el caso de Briones, aunque la precipitación ha aumentado, esto no necesariamente plantea un panorama benéfico, dado que se concentra en eventos de lluvias torrenciales que aunados a la deforestación, pueden tener efectos negativos como inundaciones, escorrentías y erosión del suelo; no obstante, también pueden ser una entrada mayor de agua al sistema hidrológico de la región. Estos cambios se relacionan con la alteración de los mecanismos micrometeorológicos que ocurren en la región debido al cambio drástico en el uso del suelo (generalmente de bosque a uso agropecuario), provocando por un lado que aumente la temperatura del suelo y del aire y por el otro que la base de las nubes se eleve. Esta elevación de los bancos de nubes acarrea no solo cambios en la precipitación pluvial y en la frecuencia de las nieblas, sino también modificaciones en la radiación solar que alcanza el tope de los bosques o cultivos. Por ello, dichos autores afirman que la deforestación en la región se relaciona con el cambio climático regional o local, el cual probablemente no ha sido tan severo debido primordialmente a dos factores. Uno es un factor orográfico, dado por la gran muralla que representa el macizo montañoso y que no permite pasar tan fácilmente la humedad a sotavento. El otro factor es biológico y se debe a la vegetación arbórea todavía existente en la región, que incluye una gran área correspondiente al cultivo de café bajo sombra. Sin embargo, como muestran las tendencias tanto de temperatura como de precipitación que no son congruentes, en tanto que para Briones y Oxtlapa la precipitación aumenta, en Teocelo disminuye. Mientras que las tendencias de la temperatura presentan otros comportamientos ya que en Briones disminuye tanto la mínima como la máxima, en cambio en Oxtlapa y Teocelo aumenta la máxima pero la mínima disminuye, mecanismo típico de la deforestación a barlovento del sitio (Barradas y Fanjul, 1986) debido a la ventilación en el área de medición.

Aunque, de continuar la deforestación, dichos estudios pronostican que la disminución de la precipitación pluvial y la frecuencia de nieblas, así como las temperatu-



ras extremas serían más notorias. Otros estudios, como el de Ávalos-Sartorio (2002) relaciona la influencia que tiene la remoción de cafetales y sus árboles de sombra en el calentamiento global, debido a que se deja de capturar dióxido de carbono. Por lo que una política pública de pagos directos a cafeticultores, por los servicios de protección de cuencas hidrológicas y captura de carbono, haría más atractivo conservar el cafetal que talarlo.

Desde este punto de vista, la existencia de vegetación boscosa constituye un elemento que protege de los cambios bruscos de temperatura, dado que la interacción planta-atmósfera modula el clima regional y la cobertura vegetal constituye un reservorio de carbono que atenúa el efecto invernadero (Shukla *et al.*, 1990; Lawton *et al.*, 2001; Pielke *et al.*, 2007).

En cuanto a la percepción que tienen los productores sobre la contribución del cultivo de café bajo sombra en la provisión de servicios ambientales, se encontró que la mayoría perciben la influencia del cultivo en la regulación del clima local. Pero además, identifican otros beneficios como la obtención de productos alimenticios y maderables, la mejora de la calidad del aire, el control de la erosión del suelo, la captación de agua y los valores paisajísticos, culturales y turísticos. La visión sobre los beneficios ambientales del cafetal bajo sombra permea su disposición a conservarlo (Moreno y Verdú, 2007). Los resultados coinciden con lo que se ha encontrado en otras investigaciones realizadas en la zona montañosa del centro de Veracruz (Del Ángel *et al.*, 2006; Hernández-Solabac *et al.*, 2011).

A la par del reconocimiento que tienen los productores de los servicios ambientales de los cafetales, está el reconocimiento de los factores políticos y económicos que inducen al cambio de uso del suelo. La mayoría de los entrevistados indicaron que el cultivo de la caña de azúcar y construcción de casas habitación han tenido una fuerte influencia en el desplazamiento del cultivo. Este cambio se relaciona principalmente con la caída del precio del café y la falta de apoyo a la cafeticultura por parte de las instituciones gubernamentales que operan en el sector agropecuario, problemáticas que se reflejan en crisis recurrentes

del sector cafetalero nacional. Para contrarrestar el impacto de la caída del precio del café en la sustitución de este cultivo, Ávalos-Sartorio (2002) propone retomar las experiencias de Costa Rica y Chiapas en cuestión de pagos de hasta \$900,00 (pesos mexicanos) por hectárea por conservar el cafetal bajo sombra.

Esta experiencia de pagos, sería sin duda un factor de peso para que se conserven los cafetales bajo sombra, ya que aproximadamente 80% de los cafeticultores expresaron que mantendrían sus cafetales en caso de que se les otorgaran pagos por servicios ambientales que los incentivarán a seguir produciendo. Es importante señalar que el resto de productores tiene seria desconfianza de los apoyos gubernamentales por experiencias negativas previas, de tal forma que casi 8% no conservaría su cafetal aún y cuando se le ofrecieran apoyos oficiales, dado que prefieren vender las parcelas, pues consideran que ya no resulta económicamente redituable la producción de café.

Lo antes expuesto pone de manifiesto que las políticas públicas que se han implementado para apoyo del sector cafeticultor no han gozado de la confianza de los productores. Esto es urgente tomando en cuenta que actualmente las políticas del sector agropecuario en general y cafetalero en particular, se caracterizan por la desregulación del sector, la fragmentación de la cadena productiva (cultivo, transformación y comercialización) y consecuentemente la formación de monopolios que la dominan (Ramírez y González, 2006). Así mismo, en las políticas institucionales del sector cafetalero se orientan los apoyos a productores medianos y grandes empresarios, excluyendo a los pequeños productores que mantienen formas diversificadas de producción de café bajo sombra (Núñez, 2005).

Aunado a lo anterior, actualmente con las iniciativas de producción de biocombustibles, los cafetales cultivados bajo sombra están siendo ampliamente amenazados por los cultivos de caña de azúcar en la región. Sustituir el área de cafetales por caña de azúcar puede acarrear consecuencias graves sobre las condiciones ambientales regionales, ya que se incrementará de manera significativa el calentamiento del aire (flujo de calor sensible) pues si se cambia masivamente una superficie muy semejante al bos-

que por un monocultivo del tipo de pastizal como es la caña de azúcar, se amenaza seriamente la estabilidad ambiental climática regional como lo han demostrado Barradas y Fanjul (1984, 1986) y Barradas *et al.* (2010).

CONCLUSIONES

En este estudio se encontró que la cafecultura es una actividad productiva que no entra en conflicto con la conservación de los ecosistemas de montaña que proveen una amplia variedad de servicios ambientales. Es una actividad que desempeñan hombres de edad adulta y con nivel de escolaridad básica. Además, sigue siendo la única fuente de ingresos para la mayoría de esta población de minifundistas, donde el cultivo de café bajo sombra ha sido una tradición familiar. Sin embargo, los cafetales están siendo substituidos por la caña de azúcar y/o por la urbanización. Las dos causas principales que más influyen en su desplazamiento, son la baja del precio del café y la falta de apoyo gubernamental. Por lo que la mayoría de los productores estarían dispuestos a mantener los cafetales, si se reconocieran mediante un programa de apoyos económicos gubernamentales los servicios ambientales que éstos prestan, tales como el de la regulación del clima, la mejora de la calidad del aire y la captación de agua; además de su valor paisajístico y de identidad cultural. En cuanto al contexto climatológico, la precipitación mostró una tendencia, por un lado, hacia el incremento de los eventos de lluvias intensas que aunado a la remoción de la cobertura arbórea pueden dar lugar a inundaciones y erosión severa del suelo, aunque también a una mayor entrada de agua al sistema hidrológico de la región, y en general a una reducción, aunque en Briones presentó un aumento considerable. Las tendencias de la temperatura, mostraron por un lado, que existe la propensión hacia un clima extremo es decir que la temperaturas máximas y mínimas aumentan y disminuyen, respectivamente, debido posiblemente a la deforestación; y por el otro, una disminución en la temperatura, lo que pudiera estar relacionado con el aumento de la precipitación.

REFERENCIAS

- Anta F., S. 2006. El café de sombra: un ejemplo de pago de servicios ambientales para proteger la biodiversidad. *Gaceta Ecológica* 80:19-31.
- Aragón G., C. 2006. Cafecultura, inequidad y pobreza. In: Ramírez V., B., J.P. Juárez S. y A. Cesín V., eds. Productos indígenas de café de la sierra nororiente de Puebla. Problemas y alternativas. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Colegio de Postgraduados. México. p:13-32.
- Ávalos-Sartorio, B. 2002. Los cafetales de sombra como proveedores de servicios ambientales. *Ciencia y Mar*, pp.17-22. <http://www.umar.mx/revistas/17/cafetales.pdf>. Consultado el 12 de mayo de 2014.
- Barradas, V.L. y L. Fanjul. 1984. La importancia de la cobertura arbórea en la temperatura del agroecosistema cafetalero. *Biótica* 9:415-421.
- Barradas, V.L. y L. Fanjul. 1986. Microclimatic characterization of shaded and open-grown coffee (*Coffea arabica* L.) plantations in Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology* 38:101-112.
- Barradas, V.L., J. Cervantes P. y C. Puchet A. 2004. Evidencia de un cambio climático en la región de las Grandes Montañas del estado de Veracruz, México. In: García C., J.C., C. Diego L., P. Fernández de Arroyabe H., C. Garmendia P. y D. Rasilla A., eds. El Clima entre el Mar y la Montaña. Asociación Española de Climatología, Universidad de Cantabria, Santander, España. p:213-219.
- Barradas, V.L., J. Cervantes-Pérez, R. Ramos-Palacios, C. Puchet-Anyul, P. Vázquez-Rodríguez y R. Granados-Ramírez. 2010. Meso-scale climate change in the central mountain region of Veracruz State, Mexico. In: Bruijnzeel, L.A., F.N. Scatena y L.S. Hamilton, eds. Tropical Montane Cloud Forests. Cambridge University Press, Cambridge. p:549-556.
- Conafor (Comisión Nacional Forestal). 2006. Nota informativa de la Comisión Nacional Forestal. 23 de mayo de 2006. <http://conafor.gob.mx>
- Contreras-Hernández, A. 2010. Los cafetales de Veracruz y su contribución a la sustentabilidad. *Estudios Agrarios* 45:143-161.

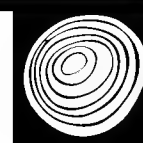


- Del Ángel P., A.L., M. Mendoza B. y A. Rebolledo M. 2006. Población y ambiente en Coatepec, valor social de la cubierta vegetal. *Espiral, Estudios sobre Estado y Sociedad* XII(36):163-193.
- FAO (Organización Mundial para la Agricultura y la Alimentación). 2007. Situación de los Bosques del Mundo 2007. FAO. Roma, Italia. 157 p.
- FAO (Organización Mundial para la Agricultura y la Alimentación). 2012. El estado de los bosques del mundo 2012. FAO. Roma, Italia. 52 p.
- García-López, T. 2009. La política mexicana de acción climática y su aplicación al estado de Veracruz. *Revista de Investigaciones Políticas y Sociológicas* 8:153-167.
- García-Romero, A., Y. Montoya, M.V. Ibarra y G.G. Garza. 2010. Economía y política en la evolución de los usos del suelo y la deforestación en México: el caso del Volcán Cofre de Perote. *Interciencia* 35:321-328.
- García S., B., F. Gallardo L., M.E. Nava T., O. Ruíz R. y E. Escamilla P. 2006. Factores que limitan la certificación de café orgánico en el esquema de comercio justo en cinco organizaciones de México. *Revista Mexicana del Caribe* X(19):205-226.
- Hartmann, D.L. 1994. Global Physical Climatology, Academic Press, San Diego, 411 p.
- Haas, P.M. 1992. Introduction: Epistemic communities and international policy coordination. *International Organization* 46(1):1-35.
- Hernández-Solabac, J.A.M., M.E. Nava-Tablada, S. Díaz-Cárdenas, E. Pérez-Portilla y E. Escamilla-Prado. 2011. Migración internacional y manejo tecnológico del café en dos comunidades del centro de Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 14(3):807-818.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2011. Censo de Población y Vivienda 2010. Principales Resultados por Localidad. 17 de julio de 2012. <http://www.inegi.org.mx>
- Jiménez-Ávila, E. y A. Gómez-Pompa. 1982. Estudios Ecológicos en el Agrosistema Cafetalero. Instituto Nacional de Investigaciones sobre los Recursos Bióticos y Compañía Editorial Continental. México, D.F. 127 p.
- Lawton, R.O., U.S. Nair, R.A. Pielke y R.M. Welch. 2001. Climatic impact of tropical lowland deforestation on nearby montane cloud forests. *Science* 294:584-587.
- Manson, R.H., A. Contreras H. y F. López-Barrera. 2008. Estudios de la biodiversidad en cafetales. In: Manson, R.H., V. Hernández-Ortíz, S. Gallina y K. Mehltreter, eds. Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz. Biodiversidad, manejo y conservación. Instituto de Ecología A.C., Instituto Nacional de Ecología. Xalapa, Veracruz, México. pp:1-14.
- Martínez C., E. 2011. Migración Internacional y cambio de uso del suelo en Bella Esperanza, Veracruz. Tesis de Maestría en Desarrollo Regional Sustentable. El Colegio de Veracruz, Xalapa, Ver. 134 p.
- Mestries B., F. 2006. Migración internacional y campesinado cafetalero en México. Fases circuitos y trayectorias migratorias. *Análisis Económico* XXI(46):263-289.
- Moguel, P. y V.M. Toledo. 2004. Conservar produciendo: biodiversidad, café orgánico y jardines productivos. *Biodiversitas* 55:2-7.
- Moreno O., C.E. y J.R. Verdú F. 2007. ¿Por qué preocuparnos por la pérdida de la biodiversidad? Relación entre biodiversidad, servicios de los ecosistemas y bienestar humano. *Cuadernos de Biodiversidad* 23:11-17.
- Nava-Tablada, M. E. y E. Martínez-Camarillo. 2012. International migration and change in landuse in Bella Esperanza, Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 15(2):21-29.
- Núñez M., M.C. 2005. Ejido, caña y café. Política y cultura campesina en el centro de Veracruz. Universidad Veracruzana. México. 365 p.
- Padlog, M. 2009. La potencia del enfoque cualitativo para el estudio de la percepción del riesgo. *Espacio abierto* 15(3):413-421
- Peterson, T. C. 2005. Climate change indices. *World Meteorological Organization Bulletin* 54(2):83-86.
- Pielke, R.A., J. Adegoke, A. Beltrán, C.A. Hiemstra, J. Lin, U.S. Nair, D. Niyogi y T.E. Nobis. 2007. An overview of regional land-use and land-cover impacts on rainfall. *Tellus* 59:587-601.

- Pineda-López, M.R., G. Ortiz-Ceballos y L. Sánchez-Velásquez. 2005. Los cafetales y su papel en la captura de carbono: un servicio ambiental aún no valorado en Veracruz. *Madera y Bosques* 11(2):3-14.
- Comisión Nacional de Areas Naturales Protegidas. 2009. Programa de Manejo del Cofre de Perote. Borrador. 155 p.
- Ramírez V., B. y A. González R. 2006. La migración como respuesta de los campesinos ante la crisis del café: estudio en tres municipios del Estado de Puebla. *Ra Ximhai* 2(2):319-341.
- Roskoski, J. 1982. Importancia de la fijación de nitrógeno en la economía del cafetal. In: Jiménez-Ávila, E. y A. Gómez-Pompa, eds. Estudios Ecológicos en el Agrosistema Cafetalero. Instituto Nacional de Investigaciones sobre los Recursos Bióticos y Compañía Editorial Continental. México, D.F. p: 56-70.
- Semarnat (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2013. Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales indicadores clave y de desempeño ambiental. Semarnat. México D.F. 361 p.
- Shukla, J., C. Nobre y P. Sellers. 1990. Amazon deforestation and climate change. *Science* 247:1322-1325.
- Stadtmüller, T. 1987. Cloud forests in the humid tropics. A bibliographic review. The United Nations University y Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica. 81 p.
- Vincent, L.A. 1998. Technique for the identification of inhomogeneities in Canadian temperature series. *Journal of Climate* 11:1094-1104.
- Williams-Linera, G. 2007. El bosque de niebla del centro de Veracruz. Ecología, historia y destino en tiempos de fragmentación y cambio climático. Instituto de Ecología y Consejo Nacional de la Biodiversidad. México. 204 p.
- Winfield C., F. 2010. Coatepec, La orduña y el azúcar. La Jornada Veracruz, 26 de marzo, México. 2 de marzo de 2012. http://www.jornadaveracruz.com.mx/Noticia.aspx?ID=100326_151035_558.
- Yin, R.K. 2009. Case study research: design and methods. 4ta ed. Sage.

Manuscrito recibido el 10 de diciembre de 2013.
Aceptado el 26 de mayo de 2014.

Este documento se debe citar como:
Ruelas-Monjardín, L.C., M.E. Nava-Tablada, J. Cervantes, V.L. Barradas. 2014. Importancia ambiental de los agroecosistemas cafetaleros bajo sombra en la zona central montañosa del estado de Veracruz, México. *Madera y Bosques* 20(3):27-40.



Respuesta de insectos descortezadores de pino y de sus depredadores a semioquímicos en el sur de México

Response of bark beetles and their predators to semiochemicals in southeast Mexico

Jorge Enrique Macías-Sámano^{1,4}, Martha Laura Rivera-Granados², Robert Jones³ y Guillermo Ibarra¹

¹ ECOSUR, El Colegio de la Frontera Sur, Chiapas, México

² Proyecto PNUD 00061777 "Fortalecimiento de la CONANP mediante mecanismos de innovación y mejora continua". Guanajuato, México

³ Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ciencias Naturales, Querétaro, México

⁴ Dirección actual: Synergy Semiochemicals Corp. BC, Canadá

RESUMEN

Se documenta la atracción en campo de insectos descortezadores (Coleoptera: Curculionidae, scolytinae) de pino y sus depredadores, a trampas multiembudos cebadas con formulaciones comerciales que contenían una de tres combinaciones de α -pineno con frontalina, ipsenol o con ipsdienol en el sur de México. El descortezador *Dendroctonus frontalis* Zimmermann fue atraído únicamente a frontalina + α -pineno. El descortezador *Ips grandicollis* (Eichhoff) (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae), los depredadores *Enoclerus ablusus* Barr (Coleoptera: Cleridae) y *Elacatis* sp. (Pascoe) (Coleoptera: Salpingidae) fueron atraídos a las combinaciones de ipsenol + α -pineno e ipsdienol + α -pineno; el depredador *Temnochila chlorodia* Mannerheim (Coleoptera: Trogositidae) respondió a todos los tratamientos. Los depredadores *Tenebroides corticalis* (Melsheimer) (Coleoptera: Trogositidae) y *Temnochila virescens* (F.) fueron capturados en números muy bajos. Los resultados de este estudio indican que el depredador *T. chlorodia*, reconoce y se orienta a los semioquímicos producidos tanto por las especies de descortezador, *D. frontalis* e *I. grandicollis*, mientras que los depredadores *E. ablusus* y *Elacatis* sp son atraídos exclusivamente por los producidos por las especies de *Ips*. Las diferentes respuestas de los insectos atrapados son discutidas a la luz de trabajos similares, enfatizando las variaciones encontradas en la asociación descortezador-depredador y la respuesta a los semioquímicos entre las poblaciones de Estados Unidos y las del sur de México para el manejo de los mismos.

PALABRAS CLAVE: Chiapas, *Dendroctonus frontalis*, depredadores, *Elacatis*, *Enoclerus*, feromonas, *Ips grandicollis*, *Temnochila*, *Tenebroides*, trampeo.

ABSTRACT

Field responses to multiple-funnel traps baited with commercial α -pinene plus either frontalin, ipsenol or ipsdienol were recorded for bark beetles and their associates in southern Mexico. *Dendroctonus frontalis* Zimmermann (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) was attracted only to frontalin plus α -pinene. *Ips grandicollis* (Eichhoff) (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae), *Enoclerus ablusus* Barr (Coleoptera: Cleridae) and *Elacatis* sp. (Pascoe) (Coleoptera: Salpingidae) were attracted to both combinations of ipsenol and ipsdienol plus α -pinene, *Temnochila chlorodia* Mannerheim (Coleoptera: Trogositidae) responded to all treatments. *Tenebroides corticalis* (Melsheimer) (Coleoptera: Trogositidae) and *Temnochila virescens* (F.) were also captured in small numbers. From these results, the predator *T. chlorodia* tuned to semiochemicals known to be produced by either *D. frontalis* or *I. grandicollis* species, whereas the predators *E. ablusus* and *Elacatis* sp were attracted exclusively to semiochemicals known to be produced by *Ips* species. Differences in response are discussed in the light of similar works, stressing the variations found between bark beetle-predator guilds and semiochemical response from North American and South Mexico.

KEY WORDS: Chiapas, *Dendroctonus frontalis*, predators, *Elacatis*, *Enoclerus*, pheromones, *Ips grandicollis*, *Temnochila*, *Tenebroides*, trapping.

INTRODUCCIÓN

Los insectos descortezadores y sus depredadores son habitantes típicos de los bosques de pino en Norte América (Islas-Salas, 1980; Dahlsten, 1982). Los insectos de las familias Trogossitidae (Coleoptera) (e. g. *Temnochila virescens* (F.) y *Temnochila chlorodia* (Mannerheim)) y Cleridae (e. g. *Thanasimus* spp. y *Enoclerus* spp.) son depredadores de las especies de descortezadores de los géneros *Dendroctonus* spp. e *Ips* spp. (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) (Islas-Salas, 1980; Dahlsten, 1982; Billings y Cameron, 1984; Billings, 1985; Reeve, 1997).

La ecología química de los depredadores es compleja y utiliza las señales químicas intraespecíficas producidas por los descortezadores para localizar su presa (Haynes y Yeargan, 1999). *Temnochila virescens* y *T. chlorodia* responden a semioquímicos liberados por sus presas (especies de *Dendroctonus* e *Ips*), a volátiles liberados por el árbol que ataca su presa, o al monoterpeno α -pineno solo, que es el principal componente de la resina de las coníferas (Wood, 1982; Billings y Cameron, 1984; Kohnle y Vité, 1984; Hofstetter *et al.*, 2008; Domínguez-Sánchez *et al.*, 2008). De la misma manera, *Thanasimus dubius* Fabricius, *Thanasimus undatulus* Say y *Enoclerus sphegeus* Fabricius, son atraídos por la frontalina sola o combinada con α -pineno (Billings y Cameron, 1984; Herms *et al.*, 1991). Sin embargo, *T. dubius* también es atraído a ipsenol e ipsdienol, ya sea individualmente o combinados (Mizell *et al.*, 1984; Raffa y Klepzig, 1989).

La respuesta de atracción a semioquímicos de *D. frontalis* y de distintas especies de *Ips* y sus gremios de depredadores están muy bien documentadas. Sin embargo dada la amplia distribución de estas dos especies de descortezadores desde el sur de Estados Unidos hasta Nicaragua (Wood, 1982), es razonable pensar que existen variaciones no sólo en las especies que conforman los depredadores asociados, sino también en su respuesta a semioquímicos para ambos grupos de descortezadores. En cuanto a este último punto son bien conocidas las variaciones en la respuesta de atracción entre las poblaciones, tanto de descortezadores como depredadores que habitan distintas localidades, a diferentes enantiómeros

de feromonas o mezclas de los mismos (Erbiling y Raffa, 2001; Reeve *et al.*, 2009).

OBJETIVOS

Evaluar la respuesta de las poblaciones de los descortezadores *D. frontalis* e *Ips* spp. y sus depredadores, en el sur de México, a trampas cebadas con feromonas y kairomonas comerciales de Estados Unidos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los experimentos fueron conducidos en bosques de pino con clima templado húmedo y con lluvias abundantes (Conabio 2014), en un rodal de segundo crecimiento de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. y *Pinus maximinoi* H.E. Moore en el municipio de Motozintla, Chiapas (N 15° 18', W 92° 16', 1420 m snm) en donde se presentaba una infestación bien establecida de *D. frontalis*.

Los experimentos corrieron del 15 de marzo al 5 de junio de 2002, y se emplearon trampas de ocho embudos, que fueron distribuidas en el bosque siguiendo un diseño de bloques al azar con cuatro réplicas para cada tratamiento. Las trampas, cada una con un tratamiento, fueron colocadas en línea y espaciadas una de otra 15 m y la misma distancia se procuró entre cada bloque. Los tratamientos fueron los siguientes: T1, trampa no cebada (control); T2, α -pineno (A); T3, frontalina (F) + (A); T4, ipsenol (IPS) + (A); T5, ipsdienol (IPD) + (A).

Los compuestos químicos se obtuvieron de Phero Tech Inc. (Delta B. C., Canadá) con las siguientes especificaciones: frontalina [(1,5-dimethyl-6,8-dioxabicyclo(3.2.1)octano)] 99% racémica (300 μ l por tubo Eppendorf) y una tasa de liberación de 2,6 mg/día; ipsenol (2-methyl-6-methylen-7-octen-4-ol) racémico (40 mg por burbuja) y liberado a 230 μ g/día; ipsdienol (2-methyl-6-methyle-2,7-octadien-4-ol) racémico (40 mg por burbuja) y liberado a 110 μ g/día; y α -pineno (2,6,6-trimethylobicyclo [3.1.1] hept-2-eno), con composición enantiomérica de 95%(-): 5% (+) y liberados a 1000 μ g/día. Las tasas de liberación fueron calculadas a 20 °C para el α -pineno, a 23 °C para la frontalina, y a 25 °C para el ipsenol e ipsdienol (PheroTech Inc.).

Todos los insectos fueron conservados en alcohol al 70% y depositados en la colección de insectos de ECOSUR, unidad Tapachula. La identificación taxonómica de Scolytinae (Coleoptera: Curculionidae) fue realizada siguiendo a Wood (1982) y la de los Trogositidae siguiendo Barron (1971). Las identificaciones de *Dendroctonus frontalis* fueron confirmadas por medio de análisis cariológico (Salinas *et al.*, 1994).

La significancia estadística entre los tratamientos fue comparada por una prueba de *t* (SAS Institute 1989).

RESULTADOS

Los resultados de los trampeos se presentan en la tabla 1. Se capturaron las siguientes especies de insectos: *D. frontalis*, *I. grandicollis*, *Temnochila virescens*, *T. chlorodia*, *Tenebroides corticalis* Mennerheim, *Enoclerus ablusus* Barr, y *Elacatis* sp. Pascoe (Coleoptera: Salpingidae).

Las principales especies de descortezadores, *D. frontalis* e *I. grandicollis*, fueron significativamente atraídas a los tratamientos con frontalina + α -pineno e ipsenol + α -pineno, respectivamente. *T. chlorodia* fue significativamente atraída a todos los tratamientos comparados con el control. *E. ablusus* fue atraído significativamente al tratamiento ipsenol + α -pineno. *Elacatis* sp. fue significativamente atraído a los tratamientos ipsenol + α -pineno como al de ipsdienol + α -pineno. Las especies, *T. virescens* y *T.*

corticalis, fueron capturadas en números demasiado bajos para realizar un análisis estadístico, la primera fue atraída solo a la mezcla con frontalina + α -pineno y la segunda a ésta última mezcla y a la de ipsdienol + α -pineno; sin embargo estas especies fueron excluidas del análisis estadístico debido al bajo número de insectos colectados.

DISCUSIÓN

Aunque el presente estudio fue realizado durante un menor periodo (tres *vs* seis meses), con menos réplicas (cuatro *vs* diez), con tres feromonas (combinadas con α -pineno *vs* sin α -pineno) y con objetivos diferentes que el realizado por Domínguez Sánchez *et al.* (2008), ambos resultados son coincidentes. En ambos estudios se observa que *D. frontalis* fue atraído a frontalina y/o a frontalina + α -pineno; e *I. grandicollis* presente en ambas localidades e *I. bonanseai* Hopkins (sólo en Lagunas de Montebello) fueron atraídos a ipsenol e ipsdienol, solos o combinados con α -pineno; los depredadores, *T. chlorodia* en ambos sitios fue atraído a todos los tratamientos; *Elacatis* sp y *E. ablusus* en ambos sitios fueron atraídos indistintamente a ipsenol e ipsdienol, ambos con α -pineno.

Las poblaciones de *T. chlorodia* de Estados Unidos son atraídas a la *exo*-brevicomina sola (Bedard *et al.*, 1980), al α -pineno solo (Rice 1969), a *exo*-brevicomina + frontalina + myrceno (Fettig y Dabney, 2006), y a diferen-

TABLA 1. Atracción en campo de *D. frontalis*, *I. grandicollis* y sus depredadores a cuatro diferentes semioquímicos en dispositivos individuales y liberados de trampas multiembudos en bosque de pino en Motozintla, Chiapas.

Semioquímico	<i>D. frontalis</i>	<i>T. chlorodia</i>	<i>E. ablusus</i>	<i>Elacastis</i> sp.	<i>I. grandicollis</i>
No cebada	0,0 \pm 0,0b	0,0 \pm 0,0b	0,0 \pm 0,0c	0,0 \pm 0,0c	0,0 \pm 0,0b
A	\pm 0,0b	14,0 \pm 5,0a	0,5 \pm 0,3c	\pm 0,0c	0,0 \pm 0,0b
F + A	15 \pm 2,0a	26,3 \pm 4,9a	2,0 \pm 0,7b	0,3 \pm 0,3b	0,0 \pm 0,0b
IPS + A	0,0 \pm 0,0b	21,4 \pm 10,7a	12,3 \pm 3,6a	4,8 \pm 2,2a	40,8 \pm 10,3a
IPD + A	0,0 \pm 0,0b	69,3 \pm 36,5a	10,8 \pm 5,1ab	5,5 \pm 2,2a	2,8 \pm 2,8b

Medias \pm ES dentro de cada columna de cada especie que tienen la misma letra, no difieren estadísticamente.
Comparaciones múltiples con t-test y una α = 0,05.
A = α -pineno, F = frontalina, IPS = ipsenol, IPD = ipsdienol.

tes mezclas enantioméricas separadas de ipsdienol e ipsenol, incluyendo la mezcla racémica usada en el presente trabajo (Dahlsten *et al.*, 2003; Fettig *et al.*, 2007). Los resultados aquí presentados, al igual que los de Domínguez-Sánchez *et al.* (2008), mostraron que las poblaciones mexicanas de *T. chlorodia* fueron atraídas a frontalina, ipsdienol e ipsenol, y a los tres combinados con α -pineno. Ello indica que esta especie tiene la habilidad de detectar y seguir una amplia gama de atrayentes para las especies de *Dendroctonus* como de *Ips*, así como para otros atrayentes liberados por los árboles de pino, como el α -pineno, donde estos depredadores potencialmente pueden localizar a sus presas.

En términos de la especificidad de los depredadores a las feromonas de sus presas en poblaciones de Estados Unidos y las estudiadas aquí, se requiere profundizar más para entender las interacciones entre presa y depredador que se presentan en los bosques de México. En el sur del país, *T. chlorodia* es el depredador que es atraído a la frontalina y por ende el único depredador con cierta especificidad para *D. frontalis*, se dice con “cierta” porque, al igual que en Estados Unidos, también es atraído a otras feromonas de otros descortezadores y al α -pineno. La especie de Cleridae presente en el sur de México fue *E. ablusus*, en lugar de *T. dubius*. Esta última especie es considerada en Estados Unidos el principal depredador de *D. frontalis* y es atraído principalmente a la frontalina (Pureswaran *et al.*, 2008), no al ipsenol o ipsdienol; por el contrario *E. ablusus* solo es atraído a estos últimos compuestos. De tal manera, que la información obtenida hasta ahora no muestra a *E. ablusus* como el principal depredador de *D. frontalis* en el sur de México.

Los insectos del género *Elacatis* han sido considerados en la literatura como atraídos a distintas feromonas de descortezadores, mas al igual que en este trabajo, las identidades de las especies de *Elacatis* son desconocidas, por lo que la información de atracción a semioquímicos por las mismas debe de ser considerada de manera tentativa. En cuanto a la especie del género *Elacatis* sp capturada, los resultados confirmaron lo encontrado por

Gaylord *et al.* (2006), Domínguez-Sánchez *et al.* (2008) y Steed y Wagner (2008), acerca de que una especie de *Elacatis* fue atraída a ipsenol e ipsdienol, lo que sugiere que las especies de *Ips* pudieran ser sus principales presas. El trabajo de Hofstetter *et al.* (2008) muestra atracción en campo a otros semioquímicos e indica que una especie de *Elacatis* responde significativamente a combinaciones de α -pineno con *exo*-brevicomina, más que a combinaciones del mismo monoterpeno con frontalina. Estos resultados en conjunto sugieren que las especies del género *Elacatis* al igual que *T. chlorodia*, son depredadores oportunistas que se alimentan de los descortezadores que tienen diferentes componentes feromonales e incluso kariomonales. Es posible que estas diferencias sean respuestas adaptativas locales para la repartición parcial del recurso descortezadores.

En el sureste de los Estados Unidos se usa ampliamente un sistema de monitoreo que predice las fluctuaciones poblacionales de *D. frontalis* con base en un grupo de trampas cebadas con semioquímicos (Billings y Upton, 2010). Este sistema se basa en el excelente conocimiento de la relación *D. frontalis* y *T. dubius*, usando una simple relación numérica proporcional entre presa y depredador, la cual ha predicho por más de 15 años y de manera confiable (R. Billings com. pers., 2014) si las poblaciones de *D. frontalis* se elevarán o no. Mas las interacciones presa y depredador son mucho más complejas, información desarrollada por Reeve *et al.* (2009) indica que en los Estados Unidos las poblaciones de *T. dubius* y *T. virescens* comparten el recurso presa mediante el uso de las feromonas de sus presas, de tal manera que en las áreas donde *D. frontalis* es abundante, *T. dubius* responde a la frontalina y *T. virescens* a ipsenol e ipsienol. Por lo que para que un sistema de monitoreo fundamentado en semioquímicos sea utilizado con efectividad en México, es imperante saber por regiones qué depredadores son los que responden consistentemente a la frontalina y a α -pineno (Macías-Sámano *et al.*, 2004), pues hasta el momento solo *T. chlorodia* es el único depredador que responde a esos compuestos y los Cleridae a feromonas de especies de *Ips*.



Aunado a lo anterior, el hecho de que ahora se conozca que la adición de *endo*-brevicomina a la combinación frontalina- α -pineno, pero distanciado de la trampa, tiene una mayor atracción para *D. frontalis* (Moreno *et al.*, 2008; Sullivan y Mori 2009) implica la necesidad de conocer el papel de este semioquímico en el comportamiento de las especies depredadores asociadas con este descortezador. Por otro lado, recientemente se ha descrito la existencia de dos morfotipos o especies crípticas de *D. frontalis* en el sur de México, que difieren en cuatro órdenes de magnitud en la emisión de la feromona *endo*-brevicomina (Sullivan *et al.*, 2012; Armendáriz-Toledano *et al.*, 2014). La presencia de estos morfos o especies crípticas plantea una nueva perspectiva semioquímica para *D. frontalis* y las especies de *Ips* asociadas a ella y sus depredadores en el sur de México, tal y como lo han probado otros estudios de ecología llevados a cabo con otros descortezadores y depredadores (Erbiling y Raffa, 2001; Reeve *et al.*, 2009).

CONCLUSIONES

Individuos de las poblaciones de dos especies de descortezadores de pino presentes en el sitio de trabajo fueron atraídos a los semioquímicos utilizados. *D. frontalis* fueron atraídos a frontalina y/o a frontalina + α -pineno; e *I. grandicollis* fueron atraídos a ipsenol e ipsdienol, solos o combinados con α -pineno; los depredadores de estas especies de descortezadores, *T. chlorodia* fueron atraídos a todos los tratamientos; *Elacatis* sp y *E. ablusus* fueron atraídos indistintamente a ipsenol e ipsdienol, ambos con α -pineno.

RECONOCIMIENTOS

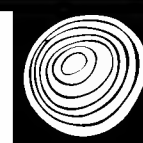
Se agradece a Gerardo Zúñiga, ENCB-IPN, y a Alicia Niño-Domínguez, Ecosur, por revisar el borrador final del manuscrito. A Ramón Cisneros, ENCB-IPN, por los análisis cariológicos. A William Barr[†] (Universidad de Idaho) y Jesús Luna (Universidad Autónoma de Querétaro) por las identificaciones taxonómicas de Cleridae, Trogositidae y Salpingidae (Coleoptera). A Jesús García y Willmar Robledo, SERNyP, Chiapas. A Armando Ventura, Armando

Virgen, J. Luis Godínez[†] y a M. Luisa García, Ecosur, por su ayuda en campo. A Liduvino López el propietario del predio en donde se realizó este trabajo. Financiamiento otorgado a JEMS por parte del SIBEJ-Conacyt y el USDA-FS, Southern Forest Research Station, y a LRG por parte del Ecosur.

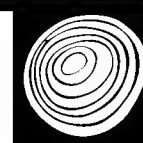
REFERENCIAS

- Armendáriz-Toledano, F., A. Niño, B.T. Sullivan, J.E. Macías-Sámano, J. Víctor, S.R. Clarke y G. Zúñiga. 2014. Two species within *Dendroctonus frontalis* (Coleoptera: Curculionidae): evidence from morphological, karyological, molecular, and crossing studies. *Annals of the Entomological Society of America* 107(1):11-27.
- Barron, J.R. 1971. A revision of the Trogositidae of America North of México (Coleoptera: Cleroidea). *Memoirs of the Entomological Society of Canada* 75:1-143.
- Bedard, W.D., D.L. Wood, P.E. Tilden, K.Q. Lindahl, R.M. Silverstein y J.O. Rodin. 1980. Field response of the western pine beetle and one of its predators to host and beetle-produced compounds. *Journal of Chemical Ecology* 6:625-641.
- Billings, R.F. 2014. Texas Forest Service, College Station TX, EUA.
- Billings, R.F. 1985. Southern pine bark beetles and associated insects effects of rapidly-released host volatiles on response to aggregation pheromones. *Zeitschrift für Angewandte Entomologie* 99:483-491.
- Billings, R.F. y R.S. Cameron. 1984. Kairomonal responses of Coleoptera, *Monochamus titillator* (Cerambycidae), *Thanasimus dubius* (Cleridae), and *Temnochila virescens* (Trogositidae) to behavioral chemicals of southern pine bark beetles (Coleoptera: Scolytidae). *Environmental Entomology* 13(6):1542-1548.
- Billings, R.F. y W.W. Upton. 2010. A methodology for assessing annual risk of Southern Pine Beetle outbreaks across the Southern region using pheromone traps. In: J.M. Pye, H.M. Rauscher, Y. Sands, D.C. Lee, J.S. Beatty, eds. *Advances in threat assessment and their application to forest and rangeland management*. General Technical Report. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture,

- Forest Service, Pacific Northwest and Southern Research Stations p:73-85.
- Conabio, 2014. http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp_087.html.
- Dahlsten, D.L. 1982. Relationships between bark beetles and their natural enemies. In: J.B. Mitton y K. B. Sturgeon, eds. Bark beetles in North American conifers. University of Texas Press. Austin, Texas. p:140-182.
- Dahlsten, D.L., D.L. Six, N. Erbilgin, K.F. Raffa, A.B. Lawson y D.L. Rowney. 2003. Attraction of *Ips pini* (Coleoptera: Scolytidae) and its predators to various enantiomeric ratios of ipsdienol and lanierone in California: implications for the augmentation and conservation of natural enemies. *Environmental Entomology* 33:1115-1122.
- Domínguez-Sánchez, B., J.E. Macías-Sámano, N. Ramírez-Marcial y J.L. León-Cortés. 2008. Respuesta kairomonal de coleópteros asociados a *Dendroctonus frontalis* y dos especies de *Ips* (Coleoptera: Curculionidae) en bosques de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 79:175-183.
- Erbiling, N. y K.F. Raffa 2001. Kairomonal range of generalist predators in specialized habitats: responses to multiple phloeophagous species emitting pheromones vs. host odors. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 99: 205-210.
- Fettig, C.J. y C.P. Dabney. 2006. Seasonal abundance of *Temnochila chlorodia* (Mannerheim) (Coleoptera: Trogositidae) collected in Western Pine Beetle pheromone-baited traps in Northern California. *Journal of Entomological Science* 41(1):75-83.
- Fettig, C.J., S.R. McKelvey, C.P. Dabney y R.R. Borys 2007. The response of *Dendroctonus valens* and *Temnochila chlorodia* to *Ips paraconfusus* pheromone components and verbenone. *Canadian Entomologist* 139:141-145.
- Gaylord, M.L., T.E. Kolb, K.F. Wallin y M.R. Wagner. 2006. Seasonality and lure preference of bark beetles (Curculionidae: Scolytinae) and associates in a northern Arizona ponderosa pine forest. *Environmental Entomology* 35(1):37-47.
- Haynes, K.F. y K.V. Yeargan. 1999. Exploitation of intraspecific communication systems: Illicit signallers and receivers. *Annals of the Entomological Society of America* 92(6):960-970.
- Hermes, D.A., R.A. Haack y B.A. Ayres. 1991. Variation in semiochemical-mediated prey-predator interactions: *Ips pini* (Scolytidae) and *Thanasimus dubius* (Cleridae). *Journal of Chemical Ecology* 17(8):515-524
- Hofstetter, R.W., Z. Chen, M.L. Gaylord, J.D. McMillin y M.R. Wagner. 2008. Synergistic effects of α -pinene and *exo*-brevicomin on pine bark beetles and associated insects in Arizona. *Journal of Applied Entomology* 132(5):387-397.
- Islas-Salas, F. 1980. Observaciones sobre la biología y el combate de los escarabajos descortezadores de los pinos: *Dendroctonus adjunctus* Bldf., *D. mexicanus* Hpk., *D. frontalis* Zimm., en algunas regiones de la República Mexicana. Boletín Técnico del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, SARH, México. 66:127p.
- Kohnle, U. y J.P. Vité. 1984. Bark beetle predators: strategies in the olfactory perception of prey species by clerid and trogositid beetle. *Zeitschrift für Angewandte Entomologie* 98:504-508.
- Macías-Sámano, J.E., A. Niño Domínguez, J.A. Cruz López, R. Altúzar Mérida y O. Maldonado. 2004. Monitoreo de descortezadores y sus depredadores mediante el uso de semioquímicos. Manual Operativo. 2ª ed. El Colegio de la Frontera Sur, Ecosur. Tapachula, Chiapas, México. 27p.
- Mizell, R.F., J.L. Frazier, y T.E. Nebeker. 1984. Response of the clerid predator *Thanasimus dubius* (F.) to bark beetle pheromones and tree volatiles in a wind tunnel. *Journal of Chemical Entomology* 10:177-187.
- Moreno, B., J. Macías, B. Sullivan y S.R. Clarke. 2008. Field Response of *Dendroctonus frontalis* (Coleoptera: Scolytinae) to Synthetic Semiochemicals in Chiapas, Mexico. *Journal of Economic Entomology* 101(6):1821-1825.
- Pitman, G.B., J.P. Vité, G.W. Kinzer y A.F. Fentiman Jr. 1969. Specificity of population aggregating pheromones in *Dendroctonus*. *Journal of Insect Physiology* 15:363-366.
- Raffa, K.F. y K.D. Klepzig. 1989. Chiral scape of bark beetles from predators responding to a bark beetle pheromone. *Oecologia* 80:566-569.



- Reeve, J.D. 1997. Predation and bark beetle dynamics. *Oecologia* 112:48-54.
- Pureswaran, D.S, R.W. Hofstetter y B.T. Sullivan. 2008. Attraction of the southern pine beetle, *Dendroctonus frontalis*, to pheromone components of the western pine beetle, *Dendroctonus brevicomis* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae), in an allopatric zone. *Environmental Entomology* 37(1):70-8.
- Reeve, J.D., B.L. Strom, L.K. Rieske, B.D. Ayres y A. Costa. 2009. Geographic variation in prey preference in bark beetle predators. *Ecological Entomology* 34:183-192.
- Rice, R. E. 1969. Response of some predators and parasites of *Ips confusus* (Lec.) (Coleoptera: Scolytidae) to olfactory attractants. *Contribution from Boyce Thompson Institute* 24:189-194.
- Salinas-Moreno, Y., G. Zúñiga-Bermúdez y R. Cisneros-Barrios. 1994. Chromosomal variation of the genus *Dendroctonus* (Coleoptera: Scolytidae). *The Southwestern Naturalist* 39(3):283-286.
- Steed, B.E. y M.R. Wagner. 2008. Seasonal pheromone response by *Ips pini* in northern Arizona and western Montana, E.U.A. *Agricultural and Forest Entomology* 10:189-203.
- Sullivan, B.T., A. Niño, B. Moreno, C. Brownie, J.E. Macías-Samano, S. Clarke, L. Kirkendall y G. Zúñiga. 2012. Biochemical evidence that *Dendroctonus frontalis* consists of two sibling species in Belize and Chiapas, Mexico. *Annals of the Entomological Society of America* 105(6):817-831.
- Sullivan, B.T. y K. Mori 2009. Spatial displacement of release point can enhance activity of an attractant pheromone synergist of a bark beetle. *Journal of Chemical Ecology* 35:1222-1233.
- SAS, Institute. 1989. SAS System for windows 3.95, Release 6.08. SAS Institute Inc. Cary, NC. USA.
- Wood, S.L. 1982. The bark beetle and ambrosia beetle of North and Central America (Coleoptera: Scolytidae) a taxonomic monograph. *Great Basin Naturalist Memoirs* 6:1-1359.
- Manuscrito recibido el 2 de agosto de 2013.
Aceptado el 18 de junio de 2014.
- Este documento se debe citar como:
Macías-Sámano, J.E., M.L. Rivera-Granados, R. Jones y G. Ibarra. 2014. Respuesta de insectos descortezadores de pino y de sus depredadores a semioquímicos en el sur de México. *Madera y Bosques* 20(3):41-47.



Avaliação de painéis aglomerados de *Toona ciliata* produzidos com diferentes densidades e teores de resina

Evaluation of particleboard of *Toona ciliata* produced with different densities and resin levels

Rosilani Trianoski^I, Setsuo Iwakiri^I e Jorge Luis Matos^I

^I Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, PR, Brasil. rosilani@ufpr.br; setsuo@ufpr.br; jmatos@ufpr.br

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas de painéis aglomerados de *Toona ciliata* produzidos com diferentes densidades e teores de resina. Foram utilizadas árvores provenientes de um plantio experimental localizado em Corupá-SC. As árvores coletadas foram seccionadas em toras e amostras de todas as posições longitudinais foram utilizadas para a determinação das propriedades da madeira e para a geração das partículas. A avaliação das propriedades da madeira consistiu na determinação da densidade básica e das propriedades químicas, as quais seguiram os procedimentos das normas COPANT e TAPPI, respectivamente. Os painéis foram produzidos segundo um delineamento inteiramente casualizado, utilizando densidades de 0,60 g/cm³; 0,70 g/cm³ e 0,80 g/cm³, e, 6% e 8% de resina, e prensados à temperatura de 160 °C, pressão específica de 4 MPa e tempo de 8 minutos. As propriedades físicas e mecânicas foram avaliadas de acordo com a metodologia proposta pela Norma Européia e pela Norma Brasileira, sendo efetuados os ensaios de densidade aparente (CEN, 2002d), absorção de água e inchamento em espessura (CEN, 2002b), flexão estática (CEN, 2002a), tração perpendicular (CEN, 2002c) e resistência ao arrancamento de parafuso (ABNT, 2006b). Os resultados indicaram que todos os tratamentos apresentaram os requisitos mínimos estabelecidos pelas normas de referência. Os painéis produzidos com menor quantidade de matéria prima (0,60 g/cm³ e 6%), além de atenderem os requisitos normativos, indicaram uma economia de até 23,73% na quantidade de partículas e até 42,80% nas quantidades de resina e catalisador, quando comparado com os demais tratamentos.

PALAVRAS CHAVE: Cedro australiano, densificação, espécies alternativas, redução de matéria prima, uréia-formaldeído.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the physical and mechanical properties of particleboard produced of *Toona ciliata* with different densities and resin levels. Trees from an experimental plantation located in Corupá-SC were used. The trees were cut into logs collected and samples of all longitudinal positions were used to determine the properties of the wood and the generation of particles. Evaluation of wood properties consisted in determining the wood density and chemical properties, which followed the procedures of COPANT standards and TAPPI, respectively. The panels were produced according to a randomized design, using nominal density of 0,60 g/cm³, 0,70 g/cm³ and 0,80 g/cm³, and 6% and 8% resin and pressed at a temperature of 160° C, at an specific pressure of 4 MPa and in atime of 8 minutes. The physical and mechanical properties were evaluated according to the methodology proposed by the European Standard and the Brazilian Standard, the tests made being apparent density (CEN, 2002d), water absorption and thickness swelling (CEN, 2002b), static bending (CEN, 2002a), perpendicular traction (tension) (CEN, 2002c) and screw pullout resistance (ABNT, 2006b). The results indicated that all treatments coplied with the minimum requirements established by the reference standards. The panels produced with fewer raw materials (density of 0,60 g/cm³ and 6% resin), in addition to meeting the regulatory requirement, indicated a savings of up to 23,73% on the amount of particles and up to 42,80% on the amounts of resin and catalyst, when compared with other treatments.

KEYWORDS: Autralian cedar, densification, species alternatives, reduction of the raw material, urea-formaldehyde.

INTRODUÇÃO

A indústria de painéis aglomerados contribui ativamente com o desenvolvimento econômico e tecnológico em função da ampla variedade e grande quantidade de produtos gerados. Segundo Tomaselli (1999) entre as décadas de 70 e 90, a produção mundial de painéis aglomerados teve aumento expressivo, passando de 30 milhões de metros cúbicos em 1975, para mais de 60 milhões de metros cúbicos em 1995. De acordo com a Abipa (2012), a capacidade nominal da indústria de painéis aglomerados no Brasil é de 4,79 milhões de metros cúbicos e a produção em 2011 foi de 3,07 milhões de metros cúbicos.

Esta elevada produção, assim como a projeção de aumento demonstrada por meio das informações da capacidade nominal instalada demonstra que o volume de madeira requerido pelo setor será ainda maior. Desta forma, para atender a demanda de matéria-prima cada vez mais crescente, torna-se necessário não somente aumentar as áreas de plantio com espécies atualmente utilizadas, mas também buscar outras espécies de rápido crescimento que possam contribuir de forma quantitativa e qualitativa para suprir as necessidades das indústrias (Trianoski, 2010).

Entre as diversas espécies de rápido crescimento destaca-se a *Toona ciliata*. É uma espécie nativa da Austrália (Keenan *et al.*, 1997; Herwitz *et al.*, 1998), pertencente a Família *Meliaceae* e popularmente conhecida como cedro australiano (Lamprecht, 1990).

No Brasil, esta espécie encontrou condições favoráveis ao seu crescimento e produção de madeira (Boletim Florestal, 2008), onde em Minas Gerais, plantios submetidos a técnicas adequadas de manejo chegam a atingir uma altura média de 20 m e DAP de 40 cm aos 12 anos de idade (Ziech, 2008).

Entre as várias utilizações descritas, como por exemplo, construção, lâminas e compensados decorativos (Paiva *et al.*, 2007), portas, janelas, carrocerias, molduras, trabalhos de torneamento (Dordel y Simard, 2009), produção de móveis, instrumentos musicais e outras finalidades especiais (Lamprecht, 1990) esta espécie demonstrou-se adequada para a produção de painéis de madeira aglomerada (Sá, 2009; Trianoski, 2010).

Entre os inúmeros fatores que exercem influência sobre os painéis de madeira aglomerada destaca-se a densidade da madeira. Esta importante variável afeta tanto as propriedades do produto final como os parâmetros do processo (Kelly, 1977; Moslemi, 1974; Maloney, 1993). Segundo Iwakiri (2005) a produção de aglomerados requer baixa densidade, e Maloney (1993) complementa que espécies com até 0,55 g/cm³ são as mais adequadas por atingirem uma razão de compactação entre 1,3 e 1,6; sendo esta faixa, a considerada ideal para o processo de densificação e consolidação do painel.

De acordo com as informações relatadas por Kelly (1977), espécies de menor densidade possibilitam a produção de painéis aglomerados com uma área de contato entre partículas satisfatória. Isto ocorre pelo fato de que espécies com densidade mais baixa necessitam de um maior volume de partículas para se obter um painel com uma mesma densidade nominal, e o conseqüente aumento do contato entre elas, resulta em um aumento expressivo de resistência (Brito, 1984). Moslemi (1974) complementa ainda, que painéis confeccionados com espécies de baixa densidade apresentam aumento na resistência à flexão, resistência a tração e módulo de elasticidade. Já a resistência ao arrancamento de parafuso, a absorção de água e o inchamento em espessura são pouco afetados.

Em relação a esta característica, a *Toona ciliata* produz madeira com densidade básica relativamente baixa, onde os resultados apresentados pela literatura são de 0,337 g/cm³ (Pereyra *et al.*, 2006), 0,245 g/cm³ a 0,364 g/cm³ (Ziech, 2008), 0,320 g/cm³ (Bufalino *et al.*, 2012). Apesar das inúmeras vantagens apresentadas por esta característica, o baixo valor da densidade implica em uma desvantagem, a qual está relacionada ao elevado volume de madeira consumido no processo produtivo, já que a matéria prima é utilizada em termos de massa de partículas secas (3%), e quanto menor a densidade, maior o volume de toras para compor um painel ou lote com uma determinada densidade nominal.

A baixa densidade da madeira implica ainda no consumo de resina e de outros aditivos. Espécies que apresentam baixa densidade necessitam de um maior volume de



partículas para compor um painel de determinada densidade nominal, logo, a área superficial é aumentada, sendo necessária uma maior quantidade de resina (Marra, 1992) para se obter boa aderência entre as partículas e uma colagem satisfatória.

OBJETIVOS

Neste contexto, considerando a baixa densidade da *Toona ciliata* e suas possíveis implicações sobre o consumo de madeira e resina no processo produtivo, este trabalho tem como objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas de painéis aglomerados produzidos a partir de madeiras desta espécie com diferentes densidades e diferentes percentuais de resina.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram selecionadas 5 árvores de *Toona ciliata*, provenientes de um plantio experimental com 17,3 anos de idade localizado em Corupá - SC, a latitude de 26°23'19,32''O, longitude 49°16'50,74''S, e altitude de 75 m.

As árvores selecionadas foram seccionadas de acordo com a altura comercial (0%, 25%, 50%, 75% e 100%), obtendo-se amostras para determinação da densidade básica e propriedades químicas, e toras para a geração das partículas. A densidade básica da madeira foi determinada de acordo com procedimentos recomendados pela Norma COPANT 461/1972 (COPANT, 1972). Já para a determinação das propriedades químicas as amostras foram transformadas em cavacos e posteriormente em serragem, a qual foi classificada de acordo com a Norma TAPPI 264 (TAPPI, 1997a). As análises químicas realizadas foram solubilidade em água fria e quente (TAPPI 207:1999; TAPPI, 1999a), extrativos em etanol tolueno (TAPPI 280:1999; TAPI, 1999b), extrativos totais (TAPPI 204:1997; TAPPI, 1997b) e materiais inorgânicos (TAPPI 211:2002; TAPPI, 2002a) e pH (TAPPI 252: 2002; TAPPI, 2002b).

Para a produção dos painéis, as toras foram novamente seccionadas, obtendo-se toretes de todas as posições longitudinais, a fim de se compreender toda a variabili-

dade existente nas árvores. A partir do processamento dos toretes foram obtidos cavacos, e estes após terem sido submetidos a um moinho de martelo originaram partículas do tipo “sliver”. As partículas foram classificadas em peneiras com granulometrias de 8 e 30 *mesh*. Após esta classificação, foi efetuada a secagem final obtendo-se partículas com um teor de umidade próximo a 3%.

Os painéis foram produzidos de acordo com o delineamento experimental proposto na tabela 1, com resina uréia-formaldeído (teor de sólidos de 65,02%, viscosidade Brookfield de 650 cP, pH de 8,57, densidade de 1,29 g/cm³ e tempo de gelatinização de 1,06 min) e, 1% de parafina. Foram manufaturados de forma homogênea com dimensões de 50 cm x 50 cm x 1,5 cm, e prensados à temperatura de 160 °C, pressão específica de 4 MPa e tempo de 8 minutos. O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado com três repetições (chapas) por tratamento.

TABELA 1. Delineamento Experimental.

Tratamento		Composição
1	Densidade nominal 0,80 – Teor de resina 8%	
2	Densidade nominal 0,70 – Teor de resina 8%	
3	Densidade nominal 0,60 – Teor de resina 8%	
4	Densidade nominal 0,80 – Teor de resina 6%	
5	Densidade nominal 0,70 – Teor de resina 6%	
6	Densidade nominal 0,60 – Teor de resina 6%	

Após a manufatura, os painéis foram conduzidos à câmara de climatização com condições ambientais controladas (20 °C ± 2 °C e 65% ± 5% UR), até atingirem umidade de equilíbrio.

As propriedades físicas e mecânicas dos painéis foram avaliadas de acordo com a metodologia proposta pela Norma Européia e pela Norma Brasileira. A avaliação das propriedades físicas consistiu na determinação da Densidade aparente (CEN, 2002d) e da Absorção de Água e Inchamento em Espessura após 2 e 24 horas (CEN, 2002b). Já a determinação das propriedades mecânicas consistiu

no ensaio de Flexão Estática (CEN, 2002a), Tração Perpendicular à Superfície (CEN, 2002c) e Resistência ao Arrancamento de Parafuso (ABNT, 2006b). Os valores experimentais foram comparados com os requisitos propostos pela Norma EN 312:2003 e NBR 14810-2:2006 (ABNT, 2006a).

Os dados obtidos foram submetidos à análise estatística (95% de probabilidade) por meio dos testes de Grubbs, Shapiro Wilks, Bartlett, Análise de Variância, e Comparação de Médias de Tukey.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Propriedades da madeira

Os valores médios obtidos para as propriedades físicas e químicas da madeira de *Toona ciliata* são apresentados na tabela 2.

TABELA 2. Resultados médios das propriedades físicas e químicas da madeira de *Toona ciliata*.

Propriedade	Valor médio	Coefficiente de Variação (%)
Densidade básica (g/cm³)*	0,33	10,42
Solubilidade em água fria (%)	6,64	4,03
Solubilidade em água quente (%)	9,24	0,08
Extrativos em etanol-tolueno (%)	7,58	3,73
Extrativos Totais (%)	10,33	3,43
pH (24 horas)	5,54	0,58
Materiais inorgânicos (%)	0,74	2,19

* Densidade básica ponderada.

De acordo com a Tabela 2 pode-se verificar que a espécie apresentou densidade básica de 0,33 g/cm³, sendo classificada como espécie produtora de madeira leve ou de baixa densidade. No entanto, mesmo com baixa densidade a espécie pode ser utilizada para produção de painéis aglomerados, onde Maloney (1993) afirma que espécies com

até 0,55 g/cm³ são adequadas para esta finalidade por atingirem uma razão de compactação entre 1,3 e 1,6, sendo esta a faixa ideal para o processo de densificação e consolidação do painel até a espessura final.

Em comparação com os resultados disponíveis em literatura, pode-se dizer que os valores médios obtidos nesta pesquisa são compatíveis com os apresentados por Pereyra *et al.*, (2006) que encontraram valor médio de 0,337 g/cm³ para árvores com idade entre 18 e 20 anos localizadas em Misiones, Ziech (2008), que obteve valores de 0,245 g/cm³ a 0,364 g/cm³ para árvores com 4 anos provenientes da região de Minas Gerais e por Bufalino *et al.*, (2012) que obtiveram média de 0,320 g/cm³ a partir de árvores com 18 anos de idades procedentes da região do Espírito Santo.

Em relação às propriedades químicas, verifica-se que a espécie apresenta elevado teor de componentes solúveis, onde o teor de extrativos totais foi de 10,33%, sendo este valor bastante superior ao apresentado por Fengel e Wegener (1989), que descrevem intervalo de 1% a 5% para espécies pertencentes ao grupo das folhosas. No que diz respeito a influência destes componentes sobre a qualidade de colagem, pode-se dizer que um elevado teor de extrativos normalmente tende a exercer influências negativas sobre as reações entre adesivo e substrato, no entanto, há que se considerar as informações relatadas por Lima *et al.* (2007), que afirmam que as reações de polimerização do adesivo e as reações entre adesivos e extrativos dependem não somente da quantidade, mas também da natureza do extrativo.

Para a propriedade de pH, observa-se que o resultado médio foi de 5,54, onde este valor apresenta-se de acordo com o intervalo de variação mencionado por Stamm (1964), e indica que a espécie não possui acidez elevada. Por outro lado, e considerando a produção de painéis aglomerados colados com resina uréica, pode-se dizer que a adição de catalisador facilita a cura da resina que ocorre entre 3,0 e 3,5 (Poblete e Zarate, 1986 citados por Poblete e Pinto, 1993), reduzindo o tempo de prensagem e, com isso, gerando maior produtividade.

Para os componentes químicos caracterizados como materiais inorgânicos, nota-se que o valor médio foi de 0,74%, o qual apresenta-se no intervalo de 0,2% a 1%, mencionado por Tsoumis (1991), e bastante inferior aos relatados por Browing (1963), Sjöström (1981) e Fengel e Wegener (1989), que afirmam que em espécies de climas tropicais este componente pode atingir até 5% do peso seco. Em relação à influência deste componente sobre o processamento da madeira para produção de painéis de madeira aglomerada, pode-se dizer que a espécie não apresenta teor de materiais inorgânicos que comprometa ou gere elevado desgaste nas ferramentas de corte ou picadores.

Propriedades dos painéis

Densidade aparente e razão de compactação

Na tabela 3 são apresentados os valores médios obtidos para as propriedades de densidade aparente (12%) e razão de compactação dos painéis.

TABELA 3. Resultados médios da densidade aparente e razão de compactação dos painéis.

Tratamento <i>D_{nominal}</i> - TR	Densidade (g/cm ³)	Razão de compactação
0,80 – 8%	0,777 a (1,83)	2,355 a (1,83)
0,80 – 6%	0,775 a (1,62)	2,348 a (1,62)
0,70 – 8%	0,691 b (3,79)	2,094 b (3,79)
0,70 – 6%	0,700 b (3,45)	2,121 b (3,45)
0,60 – 8%	0,601 c (4,14)	1,821 c (4,14)
0,60 – 6%	0,600 c (2,31)	1,818 c (2,31)

D_{nominal}: Densidade nominal; TR: Teor de resina; Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna são estatisticamente iguais pelo Teste de Tukey a 95% de probabilidade; Valores entre parênteses referem-se ao Coeficiente de Variação.

Os valores médios da densidade aparente dos painéis apresentaram valores muito próximos aos estabelecidos, onde os pequenos desvios foram observados principalmente nos tratamentos com densidade nominal mais elevada e podem ser justificados pelo fenômeno de retorno em espessura após a prensagem. Verifica-se ainda, que entre os tratamentos com mesma densidade nominal os valores médios foram muito próximos entre si, indicando que houve bom controle no experimento.

Em relação à razão de compactação, pode-se verificar que os valores médios variaram no intervalo de 1,818 a 2,355; sendo estes valores superiores aos mencionados por Kelly (1977), Moslemi (1974) e Maloney (1993), que descrevem como faixa ideal, razão de compactação entre 1,3 a 1,6. Estes elevados valores são explicados pela baixa densidade da madeira de *Toona ciliata* (0,33 g/cm³) e pelo aumento da densidade nominal dos tratamentos propostos. Pesquisas com painéis aglomerados que apresentaram elevada razão de compactação foram também desenvolvidas por Iwakiri *et al.* (2010) e Mendes *et al.* (2010).

Absorção de água e inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão

Na tabela 4 são apresentados os valores médios encontrados para a absorção de água e inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão.

Para a propriedade de absorção de água os valores médios variaram de 10,89% a 16,84% e de 32,33% a 50,59% após 2 e 24 horas, respectivamente. Pode-se verificar que ocorreu o aumento da absorção com a redução da densidade nominal, onde este resultado é justificado segundo os relatos de Vital *et al.* (1974) que mencionam que uma maior densidade nominal proporcionam uma redução na porosidade do painel, dificultando assim a absorção de água. Nota-se também, a partir dos trata-

mentos de mesma densidade nominal, que o aumento do teor de resina proporcionou uma ligeira redução na absorção, sendo este comportamento explicado pelo fato de que o maior teor de resina aplicado proporciona um maior recobrimento das partículas, tornando a superfície de contato menos permeável.

TABELA 4. Resultados médios da absorção de água e inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão.

Tratamento	AA 2h	AA 24h	IE 2h	IE 24h
$D_{nominal} - TR$	(%)	(%)	(%)	(%)
0,80 – 8%	10,89 d (4,95)	32,33 c (5,76)	6,23 a (16,02)	12,84 b (8,89)
0,80 – 6%	13,57 c (9,69)	43,88 b (6,24)	6,97 a (39,28)	17,38 a (18,07)
0,70 – 8%	14,18 bc (9,04)	40,86 b (8,97)	6,22 a (30,25)	12,74 b (12,64)
0,70 – 6%	14,46 bc (13,45)	43,84 b (13,95)	7,34 a (14,70)	15,87 a (10,05)
0,60 – 8%	16,00 ab (9,04)	45,26 b (6,81)	6,26 a (14,05)	12,26 b (11,94)
0,60 – 6%	16,84 a (13,16)	50,59 a (7,63)	6,57 a (22,96)	15,79 a (8,69)

$D_{nominal}$: Densidade nominal; TR: Teor de resina; AA: Absorção de água; IE: Inchamento em espessura; Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna são estatisticamente iguais pelo Teste de Tukey a 95% de probabilidade; Valores entre parênteses referem-se ao Coeficiente de Variação.

Em relação ao inchamento em espessura, a variação entre tratamentos compreendeu valores de 6,22% a 7,34% após 2 horas de imersão, onde para este intervalo de tempo não foi constatada diferença estatística significativa. Já após 24 horas, os valores médios de inchamento variaram de 12,26% a 17,38%, sendo observada diferença estatística significativa entre os tratamentos propostos.

Verifica-se, a partir dos tratamentos produzidos com diferentes densidades e com o mesmo percentual de resina (0,60 g/cm³; 0,70 g/cm³ e 0,80 g/cm³), que o aumento da densidade promoveu um ligeiro aumento no valor médio do inchamento em espessura. Este comportamento se deve ao fato de que nos painéis de maior densidade, a razão de compactação é mais elevada, ocorrendo uma maior liberação das tensões de prensagem por ocasião da imersão. Resultados similares foram também observados por Halligan (1970), onde este autor verificou que o aumento da densidade nominal gerava um aumento na propriedade de inchamento, no entanto, este aumento também não apresentava comportamento linear.

Por outro lado, analisando os diferentes níveis de resina em cada par de tratamentos com mesma densidade nominal, nota-se que o aumento do teor de resina proporcionou uma melhoria na propriedade de estabilidade, que variou de 21,87% a 31,08%. Resultados semelhantes foram também encontrados por Lehmann (1974), Brito (1984), Keinert Jr e Matos (1987) e Iwakiri *et al.*, (2000) que desenvolvendo estudos com diferentes percentuais de resina observaram redução na propriedade de inchamento.

Propriedades mecânicas

Na tabela 5 são apresentados os resultados médios para as propriedades de módulo de ruptura e módulo de elasticidade à flexão estática, tração perpendicular a superfície e resistência ao arrancamento de parafuso no topo e na superfície.

Os valores médios do módulo de ruptura e do módulo de elasticidade variaram de 13,02 MPa a 22,13 MPa e de 1891 MPa a 2926 MPa, respectivamente, onde pode-se verificar que com o aumento da densidade nominal, tanto o MOR quanto o MOE tenderam a apresentar valores médios mais elevados. Entre tratamentos com a mesma densidade nominal e diferentes níveis de resina, também observou-se tendência de melhoria nas propriedades. Para os ensaios de tração perpendicular e resistência ao arrancamento de parafuso comportamento similar foi observado.

TABELA 5. Resultados médios das propriedades de flexão estática, tração perpendicular e resistência ao arrancamento de parafuso.

Tratamento <i>D_{nominal}</i> - TR	Flexão Estática		Tração perpendicular	Resistência ao Arrancamento de Parafuso	
	MOR (MPa)	MOE (MPa)	(MPa)	Topo (N)	Superfície (N)
0,80 – 8%	22,13 a (6,09)	2926 a (2,22)	1,24 a (15,05)	1856 a (7,43)	1823 a (10,19)
0,80 – 6%	17,82 bc (8,61)	2435 bc (6,98)	0,85 b (18,54)	1583 b (11,76)	1771 ab (11,82)
0,70 – 8%	19,13 ab (9,76)	2684 ab (3,73)	0,89 b (30,94)	1456 bc (9,66)	1586 b (10,95)
0,70 – 6%	18,50 bc (8,12)	2485 bc (10,53)	0,87 b (20,48)	1304 c (11,28)	1543 b (11,80)
0,60 – 8%	15,61 cd (17,99)	2356 c (12,66)	0,81 b (22,25)	1069 d (15,03)	1187 c (12,92)
0,60 – 6%	13,02 d (9,36)	1891 d (5,33)	0,74 b (17,39)	1008 d (8,40)	1151 c (8,35)

D_{nominal}: Densidade nominal; TR: Teor de resina; MOR: Módulo de Ruptura; MOE: Módulo de Elasticidade; Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna são estatisticamente iguais pelo Teste de Tukey a 95% de probabilidade; Valores entre parênteses referem-se ao Coeficiente de Variação.

De maneira geral, pode-se verificar que todos os tratamentos atenderam os requisitos mínimos estabelecidos pela norma EN 312:2003 (CEN, 2003), de 13 MPa para o Módulo de ruptura, 1600 MPa para Módulo de elasticidade, 0,35 MPa para tração perpendicular e 800 N e 1020 N para arrancamento de parafuso no topo e na superfície, respectivamente, sendo tecnicamente viável a utilização da espécie para a geração de produtos com diferentes densificações e resistências.

Em comparação com os resultados obtidos para esta mesma espécie, nota-se que Sá (2009) avaliando as propriedades de painéis aglomerados com densidade nominal

de 0,70 e teor de resina de 9% (parâmetros de prensagem similares ao utilizados neste trabalho) obteve para flexão estática, módulo de ruptura e de elasticidade de 17,21 MPa e 1302 MPa respectivamente, onde estes resultados são inferiores ao deste trabalho para a mesma classe de densidade nominal, mesmo com maior teor de resina. Já para a propriedade de tração perpendicular a autora encontrou valor médio de 1,29 MPa, sendo este bastante superior os resultado da presente pesquisa.

Por outro lado, buscando a maximização deste recurso florestal e conseqüentemente da quantidade de resina utilizada para a consolidação dos painéis, nota-se que o trata-

mento com menor quantidade de matéria prima empregada (0,60 g/cm³ e 6% de resina) atende o valor mínimo de resistência, o que indica um resultado promissor. Em termos de quantificação de matéria prima no processo produtivo, verifica-se que ocorre uma redução de até 23,73% na quantidade de partículas (3% de umidade), até 42,80% nas quantidades de resina e catalisador e até 25% na quantidade de parafina.

CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

Todos os tratamentos indicaram viabilidade técnica para a produção de painéis aglomerados, atendendo os requisitos mínimos exigidos pelas normas de referência, e gerando produtos com diferentes classes de qualidade.

Em relação à estabilidade dimensional, pode-se dizer que o teor de resina exerceu maior influência sobre a absorção de água e o inchamento em espessura do que a densidade nominal.

A produção de painéis aglomerados de *Toona ciliata* com densidade nominal de 0,60 g/cm³ e 6% de resina, além de atender os requisitos normativos implica numa redução até 23,73% na quantidade de partículas, até 42,80% nas quantidades de resina e catalisador, e até 25% na quantidade de parafina, quando comparado com os demais tratamentos.

RECONHECIMENTOS

Ao CNPq, à Battistella Florestal e à Arauco do Brasil pelo suporte a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

Abipa (Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira). 2012. Disponível em: <<http://www.abipa.org.br/meioambiente.php>> Acesso em 05/08/2012.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). 2006a. NBR 14810 – 2 – Chapas de madeira aglomerada – Parte 2 – Requisitos.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 2006b. NBR 14810 – 3 – Chapas de madeira aglomerada – Parte 3 – Métodos de Ensaio.

Boletim Florestal. 2008. Cedro australiano: Valorização de espécies nobres. Boletim Florestal: Informativo Florestal do Norte Pioneiro. 7(2) :2-4.

Brito, E.O.A. 1984. Viabilidade de utilização de espécies de *Pinus* para a produção de chapas de composição estruturais “*waferboards*”. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 102 p.

Browing, B.L. 1963. The Chemistry of wood. John Wiley & Sons, New York 689p.

Bufalino, L., T.P. Protásio, A.A.S. César, V.A. Sá, e L.M. Mendes. 2012. Modelagem das propriedades físicas e mecânicas em painéis aglomerados de cedro australiano. *Floresta e ambiente* 19(2):243-249.

COPANT (Comissão Panamericana de Normas Técnicas). 1972. COPANT 461. Determinación del peso específico aparente.

Dordel, J. e S. Simard. 2009. Nurse-tree effects on Australian Red Cedar (*Toona ciliata*): a comparison of there nurse species. In: 6th North American Forest Ecology Workshop, Proocedings.

CEN (European Committee for Standardization). 2002. EN 310. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. Versão portuguesa.

CEN (European Committee for Standardization). 2003. EN 312. Particleboards – Specifications. Versão em Inglês.

CEN (European Committee for Standardization). 2002. EN 317. Determination of swelling in thickness after immersion in water. Versão em Inglês.

CEN (European Committee for Standardization). 2002. EN 319. Determinação da resistência à tração perpendicular às faces da placa. Versão Portuguesa.

CEN (European Committee for Standardization). EN 323. Determinação da massa volúmica. Versão Portuguesa.

Fengel, D. e G. Wegener, 1989. Wood Chemistry ultrastructure reactions. Waster & Grugter. Berlin. 612 p.

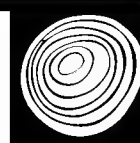
Halligan, A. F. 1970. A review of tickness swelling in particleboard. *Wood science and technology* 4:301-312.

Herwitz, S.R., R.E. Slye e S.M. Turton. 1998. Redifining the ecological niche of a tropical rain forest canopy tree species using airborne imagery: long-term crown dynamics



- of *Toona ciliata*. *Journal of Tropical Ecology* 4:683-703.
- Iwakiri, S. 2005. Painéis de madeira reconstituída. Fupef. Curitiba. 247 p.
- Iwakiri, S., A.B. Cunha, C.E. Albuquerque, E. Gorniak e L.M. Mendes. 2000. Resíduos de serrarias na produção de painéis de madeira aglomerada de eucalipto. *Scientia Agrária* 1(1-2):23-28.
- Iwakiri, S., F. Zeller, J.A. Pinto, M.G.L. Ramirez, M.M. Souza e R. Seixas. 2010. Avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum* “Paricá” e *Cecropia hololeuca* “Embauba” para a produção de painéis aglomerados. *Acta Amazonica* 40(2):303-308.
- Keinert JR. S. e J.L.M. Matos. 1987. Utilização de *Pinus pinaster* para fabricação de chapas de partículas. *Floresta* 17(1-2):113-120.
- Kelly, M.W.A. 1977. Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboards. U.S. For. Prod. Lab. General Technical. Madison. 66 p.
- Keenan R.; Lamb. D.; Woldring, O.; Irvine, T.; Jensen, R. 1997. Restoration of plant diversity beneath tropical tree plantations in Northern Australia. *Forest Ecology and Management* 99:117-131.
- Lamprecht, H. 1990. Silvicultura nos trópicos: ecossistemas florestais e respectivas espécies arbóreas – possibilidades e métodos de aproveitamento sustentado. Rossdorf: TZ – Verl.- Ges. 343 p.
- Lehmann, W.F. 1974. Properties of structural particleboards. *Forest Products Journal* 24(1):19-26.
- Lima, C.K. P., F.A. Mori, L.M. Mendes e A.C.O. Carneiro. 2007. Características anatômicas e química da madeira de clones de *Eucalyptus* e sua influência na colagem. *Cerne* 13(2):123-129.
- Maloney, T.M. 1993. Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing. 2a. ed. Miller Freeman. São Francisco. 689 p.
- Marra, A.A. 1992. Technology of Wood bonding: principles and practice. Van Nostrand Reinhold. New York. 453 p.
- Mendes, R.F., L.M. Mendes, R.A.S. Abranches, R.C. Santos e J.B. Guimarães Junior. 2010. Painéis aglomerados produzidos com bagaço de cana em associação com madeira de eucalipto. *Scientia Forestalis* 38(86):285-295.
- Moslemi, A.A. 1974. Particleboard. Southern Illinois University Press. London. 245p.
- Paiva, Y.G., G.S. Mendonça, K.R. Silva, M.E. Nappo, R.A. Cecílio e J.E.M. Pezzopane. 2007. Zoneamento agroecológico de pequena escala para *Toona ciliata*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* na Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim – ES, utilizando dados SRTM. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Anais, INPE. 1785-1792.
- Pereyra, O.; Suirezs, T.M.; Pitsch, C.; Báez, R. 2006. Estudio de las propiedades físico-mecánicas y comportamiento en procesos industriales de la madera de kiri, grevillea, paraíso y toona. *Floresta* 36(2): 213-223.
- Poblete, H.W. e A.S. Pinto. 1993. Avances sobre el efecto del catalizador em el fraguado de ureaformaldeido em table-ros de tepa. *Bosque* 14(1):55-61.
- Sá, V.A. 2009. Potencial da madeira de Cedro australiano (*Toona ciliata* M. Roem var. *australis*) na manufatura de produtos de maior valor agregado. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras. 82 p.
- Sjöström. E. 1981. Wood Chemistry fundamentals and applications. Academic Press. New York. 223p.
- Stamm, A.J. 1964. Wood and cellulose science. The Ronald Press Company. New York. 549p.
- TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry). 1997a. TAPPI 264. Preparation of wood for chemical analysis. Atlanta.
- TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry). 1997b. TAPPI 204. Solvent extractives of wood and pulp. Atlanta.
- TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry). 1999a. TAPPI 207. Water solubility of wood and pulp. Atlanta.
- TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry). 1999b. TAPPI 280. Acetone extractives of wood and pulp. Atlanta.
- TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry). 2002a. TAPPI 211. Ash in wood, pulp, paper and paper-board: combustion at 525 °C. Atlanta.

- TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry). 2002b. TAPPI 252. pH and electrical conductivity of hot water extracts of pulp, paper, and paperboard. Atlanta.
- Tomaselli, I. 1999. Tendências de mudanças na Indústria de Painéis. *Revista da Madeira* 8(43): 36-40.
- Trianoski, R. 2010. Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas de rápido crescimento para produção de painéis de madeira aglomerada. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 262p.
- Tsoumis, G. 1991. Science and technology of wood: structure, properties and utilization. New York, 494 p.
- Vital, B.R., W.F. Lehmann e R.S. Boone. 1974. How species and board densities affect properties of exotic hardwood particleboards. *Forest Products Journal* 24(12):37-45.
- Ziech, R.Q.S. 2008. Características tecnológicas da madeira de cedro australiano (*Toona ciliata* M. Roem) produzida no sul do Estado de Minas Gerais. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) Universidade Federal de Lavras, Lavras. 91p.
- Manuscrito recibido el 2 de octubre de 2012.
Aceptado el 4 de agosto de 2014.
- Este documento se debe citar como:
Trianoski, R., S. Iwakiri, J. L. M. Matos. Avaliação de painéis aglomerados de *Toona ciliata* produzidos com diferentes densidades e teores de resina. *Madera y Bosques* 20(3):49-58.



Desfibrado de maderas

obtenidas desde las oficinas salitreras de Humberstone y Santa Laura en Chile.

Un sitio del patrimonio mundial

Defibration wood obtained from the Saltpeter Works Humberstone and Santa Laura in Chile. World Heritage Sites

Rodrigo Ortiz¹* y Robert Blanchette²

¹ Laboratorio de Biodeterioro y Biodegradación de Materiales, Facultad de Ingeniería, Escuela de Construcción Civil, Universidad de Valparaíso, Chile.

² Department of Plant Pathology, University of Minnesota, EUA.

* Autor para correspondencia: rodrigo.ortiz@uv.cl

RESUMEN

En las oficinas salitreras de Humberstone y Santa Laura, declaradas Patrimonio de la Humanidad el año 2005, se presenta un inusual proceso de deterioro en el que es posible observar fibras individuales en la superficie de la madera. En este trabajo se hizo una descripción y evaluación de los daños observados en las instalaciones pertenecientes a ambas oficinas. Así mismo, se complementó el estudio mediante el análisis de las muestras recolectadas a través microscopía electrónica de barrido (SEM). Se realizaron estudios adicionales en las maderas, mediante la evaluación de la velocidad de ultrasonido y extracción de tornillo. Los resultados obtenidos determinaron que el deterioro evidenciado es de tipo químico producto de la acumulación de sales en las maderas, y cuyo efecto está asociado con la degradación de la lamela media altamente lignificada en maderas de las especies de *Pseudotsuga menziesii* y *Nothofagus obliqua*. Además, los resultados determinaron que la madera no afectada por la degradación de la sal mantiene sus propiedades mecánicas inalteradas. El deterioro evidenciado, denominado desfibrado, se presenta en mayor o menor medida en la totalidad de las instalaciones. Sin embargo, el mayor daño se encontró en los pisos superiores de la torre de lixiviación de Santa Laura, la que requiere de la aplicación de medidas preventivas asociadas con la eliminación de la sal presente en la superficie del material.

PALABRAS CLAVE: deterioro, evaluación no destructiva, lamela media, microscopía, propiedades mecánicas, sales.

ABSTRACT

In the Saltpeter Works Humberstone and Santa Laura, declared World Heritage Site in 2005, an unusual deterioration process of the wood takes place in which individual fibers can be observed on the surface of the wood. This paper gives a description and assessment of the damage observed in the installations belonging to both office buildings. Also, the study was supplemented by analysis of samples collected through scanning electron microscopy (SEM). Additional studies in the wood by evaluating the ultrasound velocity and screw extraction were conducted. The results determined that the deterioration is chemical attack due to the accumulation of salts present in the wood, and whose effect is associated with the degradation of the highly lignified middle lamella in *Pseudotsuga menziesii* and *Nothofagus obliqua* woods. Moreover, the results showed that the wood unaffected by the degradation of the salt maintains unchanged its mechanical properties. The evident deterioration, which is called defibration, has been developed in varying degrees in all installations. However, the biggest damage is presented in the upper floors of the leaching at tower Santa Laura, which requires the application of preventive measures associated with the removal of salt on the surface of the material.

KEY WORDS: deterioration, nondestructive evaluation, middle lamella, microscopy, mechanical properties, salts.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo minero de Chile es propio de la “República” (Vial, 1987), concentrándose mayoritariamente en las provincias del norte, en cuyas zonas desérticas existe poca actividad ligada a la agricultura y silvicultura (Culverwell, 2000).

La explotación minera de salitre, que es utilizado como abono agrícola y materia prima de explosivos, convirtió a Chile a fines de la Guerra del Pacífico (1879-1883) en el único fabricante y exportador en el mundo (Vial, 1987), transformándose en el producto principal de la minería hasta la gran depresión de 1930, tiempo en el que se produjo la caída del mercado de consumo debido al desarrollo de métodos alternativos para la síntesis de nitrógeno y la disminución de la demanda de nitratos (Culverwell, 2000). Sin embargo, la explotación histórica del salitre abarca desde la época prehispánica hasta la actualidad (Minvu, 2003).

Las oficinas Salitreras de Humberstone y Santa Laura se encuentran ubicadas en la Región de Tarapacá, Provincia de Iquique, en la denominada Pampa del Tamarugal a 1050 msnm. De acuerdo con lo establecido por el Minvu (2003), estos sitios constituyen un conjunto industrial integral, lo que queda de manifiesto debido a que Santa Laura mantiene los rasgos esenciales del procesamiento del salitre en el área industrial, mientras que Humberstone ha mantenido el campamento urbano. Las instalaciones de ambas salitreras conservan ineludibles testimonios de su materialidad, estando constituidas, mayoritariamente, por cubiertas de zinc acanalado, concreto pampino, y madera de *Pseudotsuga menziesii* (Pino Oregón).

El estado de conservación de los inmuebles presenta evidentes daños provocados por numerosos saqueos, los que en algunos casos han comprometido estructuralmente las instalaciones. Así mismo es posible observar deterioros menores provocados por hongos e insectos. Sin embargo, y durante muchos años, producto del proceso industrial, condiciones climáticas y acumulación de minerales salinos, las maderas de estas salitreras han quedado expuestas a un inusual y lento deterioro no biológico denominado desfibrado, deterioro en el que es posible observar masas

de fibras desprendidas de la madera. Si bien es cierto que este proceso de deterioro tiene gran repercusión, los antecedentes bibliográficos que lo estudian y/o describen son escasos (Parameswaran, 1981; Bootle, 2005; Wilkins y Simpson, 1988; Wilcox *et al.*, 1991; Johnson *et al.*, 1992; Schneider *et al.*, 1997; Ku erová *et al.*, 2008)

OBJETIVO

Considerando lo anterior, y en virtud que las oficinas salitreras de Humberstone y Santa Laura están constituidas de manera importante por instalaciones construidas en madera, se desarrolló el presente trabajo cuyo objetivo fue describir el evidente daño, denominado desfibrado, asociado a condiciones de salinidad al que está sometido este sitio del Patrimonio Mundial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Extracción y almacenamiento de madera

La madera se extrajo desde las oficinas salitreras de Humberstone y Santa Laura en la provincia de Iquique en Chile. Se consideró una recolección de tipo oportunista. Se recolectaron muestras de madera con diferentes estados de deterioro. Adicionalmente, se recolectaron maderas sin deterioro para la identificación de las especies utilizadas en las estructuras. Las muestras obtenidas se colocaron en bolsas plásticas estériles y se llevaron al Laboratorio de Biodeterioro y Biodegradación de Materiales de la Universidad de Valparaíso donde se almacenaron a 4 °C.

Evaluaciones macroscópicas y microscópicas

Se realizaron evaluaciones macroscópicas y microscópicas para la identificación de las especies y la determinación de los daños presentes en el material. Las probetas destinadas al análisis macroscópico se prepararon de acuerdo con el protocolo establecido por Díaz-Vaz (1979). Las muestras para microscopía electrónica de barrido (SEM) se prepararon utilizando las técnicas previamente descritas por Blanchette y Simpson (1992). La observación microscópica y captura fotográfica se realizó mediante la utiliza-



ción de un microscopio electrónico de barrido Carl Zeiss, modelo EVO-MA 10.

La identificación macroscópica y microscópica de las especies de madera se realizó, mediante el uso de claves, según lo informado por Díaz-Vaz (1979).

Evaluaciones no destructivas

Se realizaron evaluaciones, de la capacidad resistente en madera de *Pseudotsuga menziesii* debido a su utilización mayoritaria como material estructural, mediante la técnica no destructiva de ultrasonido y la técnica *pseudo* no destructiva de extracción de tornillo. En ambas evaluaciones se utilizaron probetas cúbicas, de 5 centímetros de arista, acondicionadas a 12% de contenido de humedad.

Para la evaluación mediante ultrasonido se utilizó un equipo, de baja frecuencia con transductores de polaridad longitudinal de 54 Khz, James Instruments Inc. modelo V-meter MKIV. Las mediciones se realizaron en forma directa y en el plano longitudinal a la fibra.

La evaluación mediante extracción de tornillo se realizó utilizando un equipo Fakopp Enterprise de 5 kN de capacidad. Se utilizaron tornillos de 4 mm de diámetro, los que fueron introducidos en su parte inferior y media con la finalidad de producir una fuerza de arranque en las fibras situadas a una profundidad de entre 20 mm y 38 mm. Los tornillos se introdujeron en forma perpendicular a la fibra. Se determinó la densidad de la madera de acuerdo con lo señalado por Basterra (2009).



FIGURA 1. Oficina salitrera Santiago Humberstone. A: Viviendas continuas con Porche. B: Iglesia y Mercado. C: Teatro. D: Pulpería.

RESULTADOS

De las oficinas salitreras de Humberstone y Santa Laura se retiraron alrededor de 150 y 100 muestras de madera respectivamente, correspondientes a las zonas: Industrial, Edificios y Espacios Públicos y Campamento (Figs. 1, 2 y 3). La identificación macro y microscópica de las muestras de maderas analizadas correspondieron a las especies *Nothofagus obliqua* y *Pseudotsuga menziesii*, siendo esta última la especie de mayor uso.

Oficina Salitrera Santiago Humberstone

Zonas de edificios, espacios públicos y campamento

En general las maderas presentes en ambas zonas (Figs. 1A, 1B, 1C y 1D) se encuentran relativamente sanas, lo

que ha permitido que parte importante de las edificaciones que las constituyen sean accesibles y sin riesgo para los visitantes. Sin embargo, es evidente en mayor o menor medida la presencia de madera desfibrada, mayoritariamente, en elementos exteriores.

Aún cuando los revestimientos de concreto pampino de determinadas edificaciones se encuentran algo dañados y en algunos casos desprendidos, estos han evitado el incremento del deterioro en los elementos de madera.

Con relación a las edificaciones con revestimiento exteriores de madera (Fig. 1C), estos se encuentran en buen estado de conservación con mínimos grados de desfibrado.

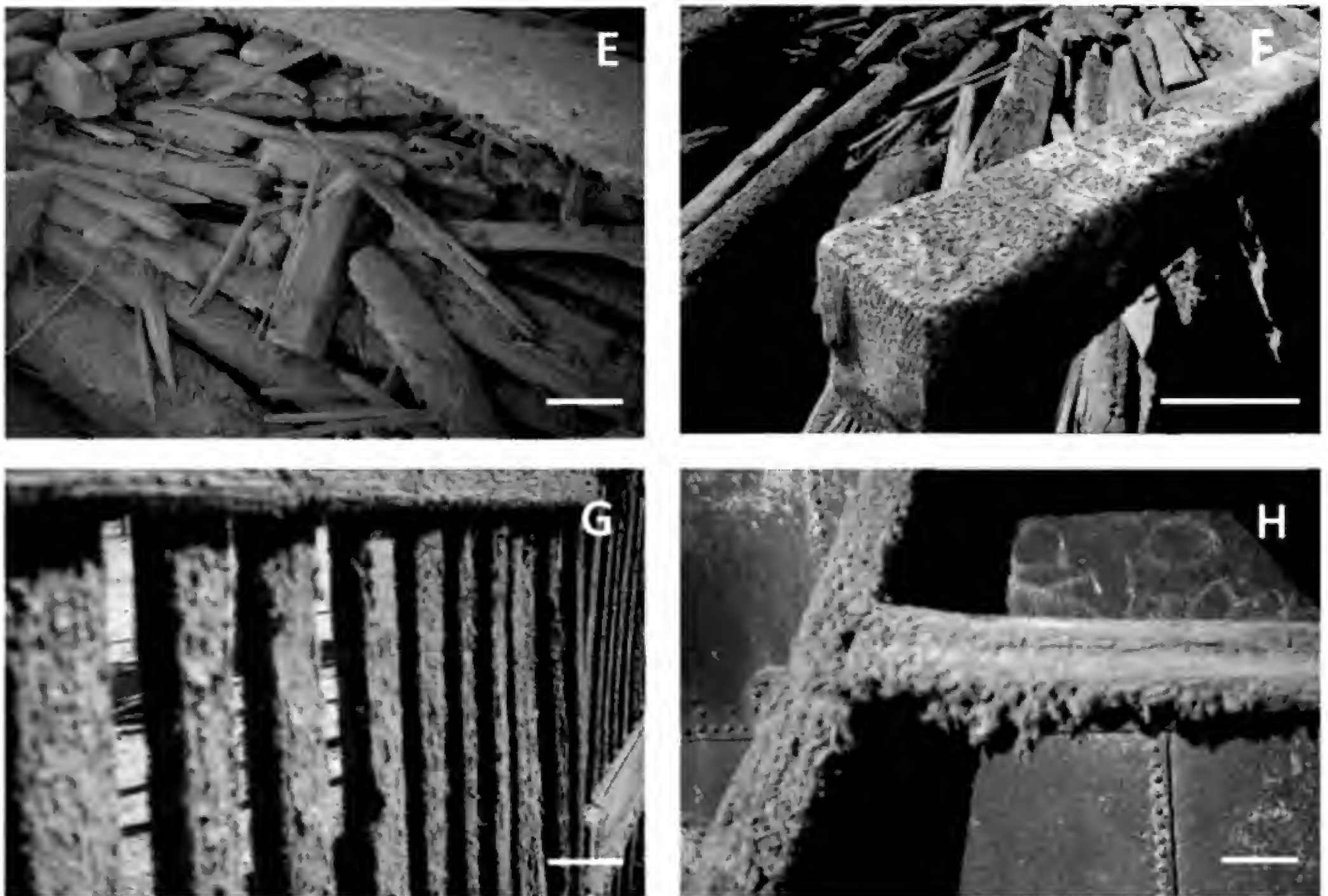


FIGURA 2. Oficina salitrera Santiago Humberstone. E y F: Pilas de maderas de zona industrial. G: Reja de madera cercana a zona de lixiviación. H: Escalera cercana a zona de lixiviación. Barras en E = F = 10 cm, G = H = 5 cm.



FIGURA 3. Oficina salitrera Santa Laura. I: Planta de lixiviación. J: Casa de yodo y SSHH públicos. K: Madera desfibrada casa de bombas. L: Madera desfibrada planta de lixiviación. Barras en K = L = 10 cm.

Zona Industrial

En la zona industrial se pueden observar de manera evidente los efectos físicos del proceso de desfibrado (Figs. 2E, 2F, 2G, 2H), especialmente en las maderas expuestas a la intemperie, de las que se encuentran cantidades importantes desechadas en grandes montículos de material (Figs. 2E, 2F).

Así mismo es posible observar este deterioro en las maderas que constituyen la zona de talleres, bodegas, maestranzas, molienda y carpintería, entre otras. Estas maderas se encuentran en mejor estado de conservación, producto, quizás, de su menor grado de exposición: no obstante, el daño es evidente.

Oficina Salitrera Santa Laura

Zonas de edificios, espacios públicos y campamento

A diferencia de la oficina salitrera Humberstone, la oficina Santa Laura mantiene poca presencia de instalaciones pertenecientes a la zona de edificios y espacios públicos (Fig. 3J). Sin embargo, estos se mantienen en buenas condiciones con niveles variables de desfibrado en sus elementos de madera. Con respecto a la zona de campamento es posible observar vestigios de sus edificios, la que no sólo quedó expuesta a deterioros de tipo químico, físico, mecánico y biológico, sino que ha debido soportar numerosos saqueos que la han devastado en un 95% aproximada-

mente, quedando en pie sólo parte de las vivienda de los obreros solteros y obreros casados, cuyas maderas presentan leves niveles de daño.

La zona Industrial de la oficina salitrera Santa Laura cuenta con cerca del 100 % de sus instalaciones en pie (Figs. 3I, 3J, 3K, 3L), todas afectadas en menor o mayor medida por el desfibrado.

La madera de los edificios correspondientes a corral y galpón de mulas, bodega de materiales, taller de locomotoras y maestranza, compresores, enfriamiento, casa de fuerza y taller de brocas se encuentran en buen estado de conservación. Sin embargo, hay evidencia de deterioro superficial menor por desfibrado, y cuyo aumento ha sido impedido, de cierta manera, por la presencia de su envolvente metálica.

En relación con los edificios e instalaciones correspondientes a molinos primarios, correa transportadora y molinos secundarios se encuentran en buen estado. No obstante, existe un daño superficial en la mayoría de sus elementos, contrastando de forma evidente con zonas específicas de mayor profundidad de desfibrado y evidente presencia salina. De manera general, los deterioros señalados en todas las zonas descritas no presentan riesgos.

Las estructuras correspondientes a la casa de bombas, casa de yodo y planta de lixiviación (Figs. 3I, 3J, 3K, 3L) son las que presentan el mayor nivel de daño de los elementos de madera que las constituyen. Siendo esta última estructura (Fig. 3I) la que en su conjunto presenta el mayor grado de deterioro, lo que ha llevado a disminuir las secciones transversales de sus elementos. En este con-

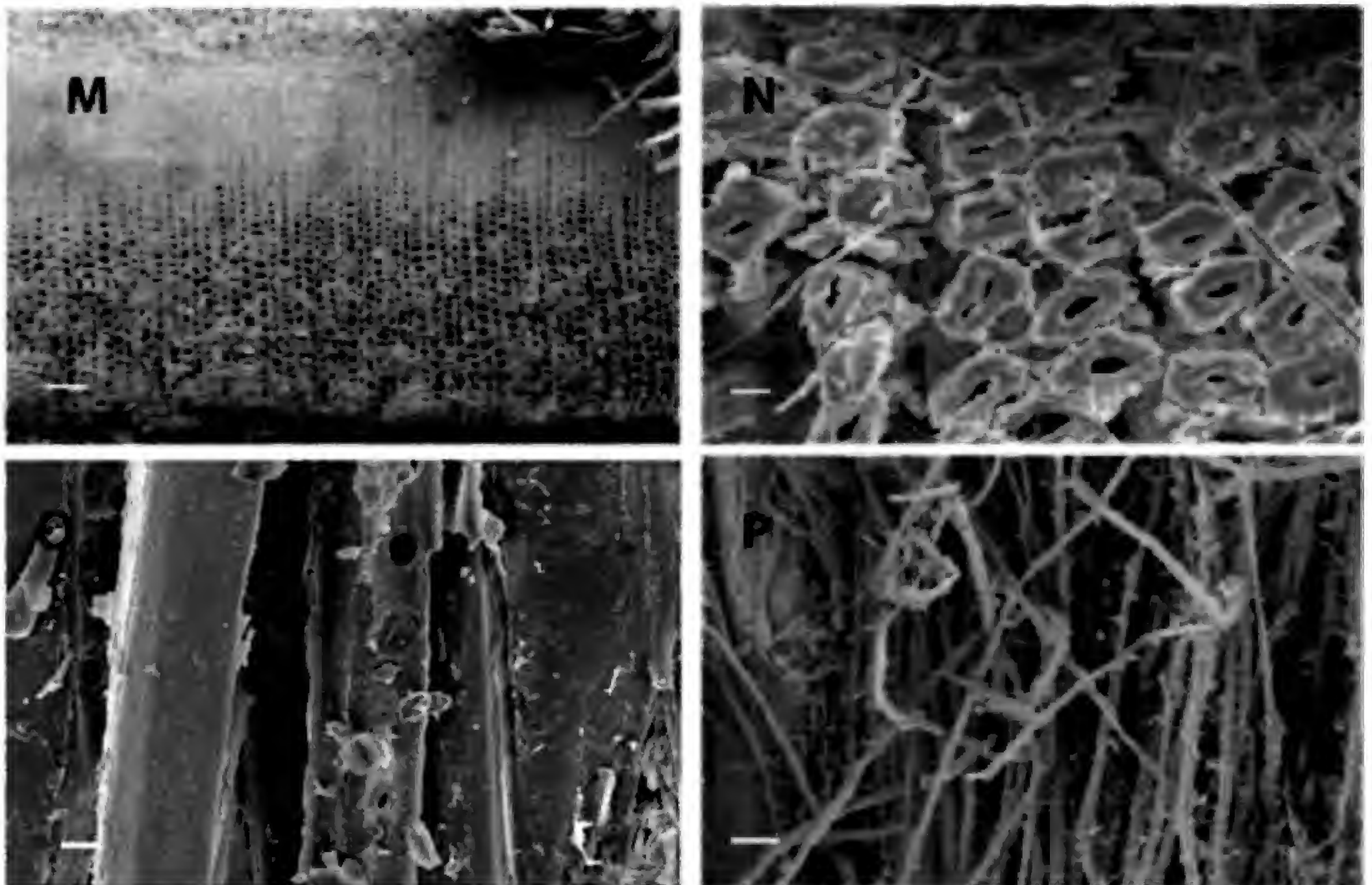


FIGURA 4. Microscopía electrónica de barrido en madera de *Pseudotsuga menziesii*. M: Sección transversal. N: Degradación de lamela media. O y P: Plano perpendicular: fibras de celulosa. Barras en M = P = 200 μ m, N = O = 20 μ m.



texto, los daños se presentan en aumento, desde el primer hasta el tercer nivel respectivamente, observándose importante acumulación salina en los últimos dos niveles.

Análisis microscópicos

La figura 4 muestra las imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) de madera correspondiente a la especie *Pseudotsuga menziesii*. Deformación de la sección transversal de las fibras y su separación resultan ser evidentes (Figs. 4M, 4N, 4O), lo que también puede ser observado en los planos perpendiculares de la muestra (Fig. 4P). Estos efectos son producidos debido a la degradación de la lamela media, exponiendo con total libertad

las fibras celulósicas. Similar daño se observa en la figura 5 en madera correspondiente a la especie *Nothofagus obliqua*. Las imágenes permiten determinar, al igual que para la especie *Pseudotsuga menziesii*, deformación de la sección transversal de las fibras y degradación de la lamela media (Figs. 5Q, 5R, 5S, 5T).

Análisis no destructivos

Los resultados obtenidos en los análisis no destructivos, con las maderas de *Pseudotsuga menziesii* obtenidas desde ambos sitios, determinaron que el valor promedio de velocidad de ultrasonido fue de 4518 m/s, velocidad no menor a 5% de lo encontrado por Niemz *et al.* (1994) en madera

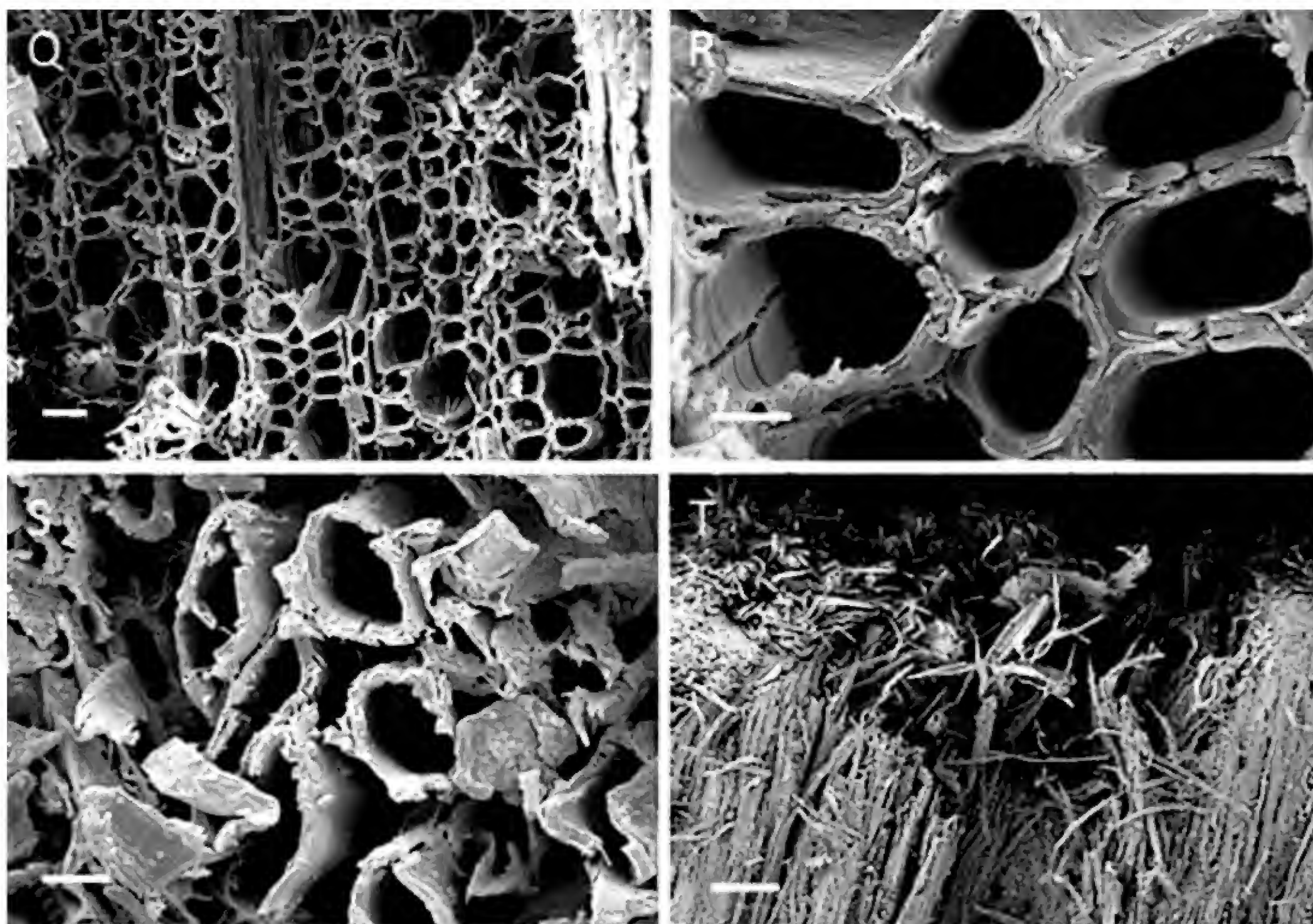


FIGURA 5. Microscopía electrónica de barrido en madera de *Nothofagus obliqua*. Q: Sección transversal. R y S: Sección transversal-degradación de lamela media. T: Sección lateral fibras de celulosa. Barras en Q = 40 μm , R = S = 10 μm , T = 400 μm .

sana. Además, a partir de las evaluaciones realizadas mediante la técnica de extracción de tornillo se obtuvo un valor de densidad promedio de 430 kg/m³. Este último valor es 3,6% menor que la densidad normal de 446 kg/m³, según la norma NCh 176/2 of. (1986), establecida para madera sana.

DISCUSIÓN

El proceso de corrosión de la sal sobre la lamela media de la madera no ha sido comúnmente encontrado en el mundo ni ampliamente descrito en la literatura. No obstante, se ha detectado en muelles y pilares de muelles tratados con sales CCA y creosota, construcciones expuestas al mar, rutas de sal, almacenes de fertilizantes, plantas de producción de ureas (Parameswaran, 1981; Wilcox *et al.*, 1991; Johnson *et al.*, 1992), superficies internas de barcos, torres de refrigeración (Bootle, 2005), maderas de techumbres de zonas costeras de Sydney, Australia (Wilkins y Simpson, 1988), maderas de techumbres tratadas con retardantes al fuego basados en sulfato de amonio y fosfato de amonio (Ku erová *et al.*, 2008) y maderas pertenecientes a las chozas de las expediciones históricas en la región del mar de Ross en la Antártica (Blanchette *et al.*, 2002). De acuerdo con lo señalado por Blanchette *et al.* (2002), los antecedentes bibliográficos existentes determinan, independientemente de la fuente y composición salina, idénticos daños en los distintos elementos analizados.

Ku erová *et al.* (2008), a partir de estudios anatómicos de madera mediante microscopía electrónica de barrido, determinaron que tanto lignina como celulosa fueron dañadas, presentando, en algunos casos, deterioro mecánico en las fibras debido a presiones de cristalización. Asimismo estos autores agregan que la separación observada en las células se debe, aparentemente, a daños producidos en la lamela media, que es una zona altamente lignificada. Según Blanchette *et al.* (2002) este daño es producido por la disolución de la lamela media debido a una actividad corrosiva desarrollada por sales, siendo la separación de las fibras una forma progresiva de deterioro. En este contexto, Johnson *et al.* (1992) agregan que en esta actividad corrosiva los químicos penetran la madera

como solutos en agua, formando cristales cuando el agua es evaporada. Con relación a las fibras celulósicas, Ku erová *et al.* (2008) señalan que se han observado grietas en la capa S2 de la pared celular, llegando en algunos casos a la desintegración de las fibras formando, presumiblemente, estructuras supramoleculares de celulosa. No obstante lo anterior, estos autores agregan que, de acuerdo a los estudios realizados, el daño provocado no tiene efecto en las propiedades mecánicas de las áreas adyacentes a la zona deteriorada. Lo anteriormente señalado está en concordancia con los resultados obtenidos en las evaluaciones de velocidad de ultrasonido y extracción de tornillos realizadas en el presente trabajo, los que confirman que las maderas no afectadas por el fenómeno de desfibrado mantienen sus propiedades mecánicas dentro de los valores esperados.

Con respecto al deterioro producido en las salitreras de Humberstone y Santa Laura, sin lugar a dudas, este se encuentra estrechamente ligado con el clima, los procesos industriales de fabricación del salitre y la acumulación de minerales salinos en los depósitos de nitratos chilenos, tales como: halitas, nitratos, sulfatos, yodatos, cromatos y boratos, entre otros, los que en conjunto han permitido, por muchos años, el transporte y acumulación de sales así como el posterior deterioro de las maderas constituyentes de las edificaciones. Estudios realizados por Bahamóndez y Villagrán (2009) señalan que el deterioro en las maderas fue producto de derrames de soluciones salinas en el proceso de producción del caliche, y cuya impregnación al interior de la madera junto con los constantes ciclos de secado y humidificación someterían a la madera a fuertes solicitaciones mecánicas a nivel microscópico. Estos autores agregan que daños similares, pero de menor profundidad, son atribuidos al denominado “shok térmico” debido a la exposición de algunos elementos a altas temperaturas. Blanchette *et al.* (2002) sostienen que los problemas de desfibrado resultan ser más serios en áreas protegidas de las lluvias lo que facilitaría la acumulación de sales. Sin embargo, para los sitios estudiados en el presente trabajo las mayores acumulaciones de sal y los mayores daños observados se encuentran al exterior y la zona geográfica



no es afectada por lluvias. Farrell (2007) agrega que los daños pueden ocurrir rápidamente en lugares donde grandes concentraciones de sal están en contacto con madera húmeda, o muy lentamente cuando bajas concentraciones de sal son acumuladas en la madera después de la evaporación del agua. Estas situaciones fueron evidenciadas tanto en la torre de lixiviación como en los molinos primarios de la oficina salitrera de Santa Laura. De acuerdo con lo señalado por Bahamóndez y Villagrán (2009), la humedad presente se asocia con el fenómeno de camanchaca.

Como medida de preservación, es necesario detener o al menos disminuir la migración de sales al interior de las maderas considerando una remoción no abrasiva. De manera particular y urgente deben tomarse precauciones en la torre de lixiviación de Santa Laura, donde es evidente la acumulación de costras de sal en los niveles superiores, estas costras deben ser eliminadas. Al mismo tiempo es preciso profundizar en las investigaciones que han sido desarrolladas hasta el momento, Blanchette *et al.* (2002) coinciden en que esto es necesario con el fin de entender de mejor manera el proceso de desfibrado y así desarrollar mejores métodos de control.

CONCLUSIONES

El estudio realizado en las oficinas salitreras de Humberstone y Santa Laura ha determinado que los daños, más evidentes, son producidos por un fenómeno denominado desfibrado, que tiene como resultado la degradación de la lamela media de la madera.

El proceso de desfibrado se desarrolla desde la superficie del material, por lo que, y de acuerdo con los antecedentes bibliográficos y los resultados obtenidos mediante técnicas no destructivas, no hay disminución de la resistencia mecánica en las secciones que no han sido afectadas. Sin embargo, es necesario realizar acciones preventivas de eliminación de costras de sal en lugares donde esta se encuentre presente pues se constituyen como focos potenciales de daño acelerado.

Se deben realizar futuros trabajos con el fin de determinar mecanismos de control del deterioro, verificar el

progreso o detención del daño y la eventual protección que la capa superficial de madera degradada estaría entregando al sustrato. Lo anterior se considera como información relevante en orden a aportar en el conocimiento y eventual control de esta particular forma de deterioro de la madera.

RECONOCIMIENTOS

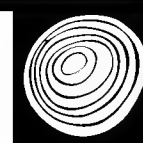
Los autores de este trabajo agradecen la colaboración brindada por el señor Silvio Zerega Zegarra, Director Ejecutivo de la corporación Museo del Salitre, quien facilitó el ingreso a los recintos y el retiro de muestras para el desarrollo de este trabajo.

De igual manera se agradece la colaboración brindada por la Dirección de Investigación de la Universidad de Valparaíso DIUV en el financiamiento del proyecto 52/2011.

REFERENCIAS

- Bahamóndez, M. y A. Villagrán. 2009. Elaboración de expedientes y estudio, segunda etapa del plan de intervenciones prioritarias para las oficinas salitreras Humberstone y Santa Laura. [en línea] <https://www.dropbox.com/s/58758vugpxu81qq/Informe%20Estudio%20de%20Materiales.pdf> . [consulta : 07 enero 2011]
- Basterra, L., L. Acuña, M. Casado, G. Ramón-Cueto y G. López. 2009. Diagnóstico y análisis de estructuras de madera mediante técnicas no destructivas: aplicación a la Plaza Mayor de Chinchón (Madrid). *Informes de la Construcción* 61(516):21-36.
- Blanchette, R.A. y E. Simpson. 1992. Soft rot decay and wood pseudomorphs in an ancient coffin (700 BC) from tumulus MM at Gordion, Turkey. *International Association of Wood Anatomists Bulletin* 13:201-213.
- Blanchette, R., B. Held y R. Farrell. 2002. Defibration of wood in the expedition huts of Antarctica: an unusual deterioration process occurring in the polar environment. *Polar Record* 38(207):313-322.
- Bootle, K. 2005. Wood in Australia: types, properties, and uses. McGraw Hill. Sydney, Australia. 452p.

- Culverwell, M. 2000. The mining cluster in Antofagasta. Integrating small and medium supplier into the productive chain. [en línea] <http://www.aia.cl/ingles/archivos/cluster/MalaikaCulverwell.pdf> [consulta : 03 enero 2011]
 - Díaz-Vaz, J. 1979. Claves para la identificación de maderas de árboles nativos y cultivados en Chile. *Bosque* 3(1):15-25.
 - Farrell, R. 2007. Scientific evaluation of deterioration of historic huts of Ross Island, Antarctica. *New Zealand Science Teacher* 114:12-14.
 - Johnson, B., R. Ibach y A. Baker. 1992. Effect of salt water evaporation on tracheid separation from wood surfaces. *Forest Products Journal* 42(7/8):57-59.
 - Kučerová, I., M. Ohlídalová, J. Frankl, M. Kloiber y A. Michalcova. 2008. Defibring of historical roof beam caused by ammonium sulphate and ammonium phosphates based fire retardants. International conference on wood science for preservation of cultural heritage: Mechanical and biological factors. 5-7 Noviembre. Braga, Portugal.
 - Minvu. 2003. Postulación de las oficinas salitreras Humberstone y Santa Laura para su inclusión en la lista del Patrimonio Mundial/Unesco. [en línea] http://www.archivochile.com/Historia_de_Chile/sta-ma2/4/stama-cult00003.pdf [consulta: 03 enero 2011]
 - Niemz, P., A. Aguilera y A. Roller. 1994. Velocidad de propagación del sonido en algunas especies creciendo en Chile y su relación con propiedades físicas. *Bosque* 15(2):49-54.
 - NCh 176/2 Of. 1986. Madera-Parte 2: Determinación de la densidad.
 - Parameswaran, N. 1981. Micromorphology of spruce timber after long-term service in a potash store house. *Holz and Roh und Werkstoff* 39:149-156.
 - Schneider, P., C. Freitag y J. Morrel. 1997. Decay resistance of saltwater-exposed douglas-fir piles. *Wood and fiber science* 29(4):370-374.
 - Vial, G. 1987. Panorama histórico del sector minero en Chile. *Amb y Des* Número especial:21-27.
 - Wilcox, W., E. Botsau y H. Kubler. 1991. Wood as a building material: a guide for designers and builders. 2nd Revised edition. Jhon Wiley & Sons. Nueva York. 232p.
 - Wilkins, A. y A. Simpson. 1988. Defibring of roof timbers. *Journal of the Institute of Wood Science* 11(3):121-125.
- Manuscrito recibido el 17 de junio de 2011.
Aceptado el 12 de mayo de 2014.
- Este documento se debe citar como:
Ortiz, R. y R. Blanchette. 2014. Desfibrado de maderas obtenidas desde las oficinas salitreras de Humberstone y Santa Laura en Chile. Un sitio del patrimonio mundial. *Madera y Bosques* 20(3):59-68.



Anatomía de la madera

de doce especies de un bosque mesófilo de montaña de Tamaulipas, México

Wood anatomy of twelve species of a cloud forest from Tamaulipas, Mexico

Moisés Aguilar-Alcántara¹, Silvia Aguilar-Rodríguez^{1*} y Teresa Terrazas²

¹ Unidad de Morfología y Función. Universidad Nacional Autónoma de México, FES Iztacala, Estado de México, México.

² Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., México

* Autor para correspondencia: siagro@campus.iztacala.unam.mx

RESUMEN

La flora leñosa del bosque mesófilo de montaña (BMM) en Tamaulipas posee diferentes taxa con respecto a otros BMM de México. En consecuencia, los caracteres anatómicos de la madera de sus especies pueden expresar dicha variabilidad, relacionada con el ambiente y con los linajes a los cuales ellas pertenecen. En este trabajo se realizó la descripción anatómica de la madera de 12 especies propias del BMM, provenientes de la Reserva de la Biosfera “El Cielo”, Tamaulipas, que corresponde al más boreal de México. A diferencia de otros BMM del país, los resultados muestran una tendencia a la presencia de anillos de crecimiento evidentes; este carácter parece estar relacionado con la posición geográfica de este BMM. Otros caracteres como la porosidad difusa, vasos con diámetro tangencial < 100 µm, elementos de vaso con engrosamientos helicoidales y longitudes > 350 µm, fibras > a 900 µm, además de parénquima axial escaso, son características frecuentes en las especies estudiadas. Se discute el posible significado de la presencia de anillos de crecimiento y se comparan algunos caracteres anatómicos de las especies estudiadas con sus grupos afines a nivel de género y familia.

PALABRAS CLAVE: anatomía comparada, anillos de crecimiento, placas de perforación escalariforme, porosidad difusa, Reserva de la Biosfera «El Cielo», xilema secundario.

ABSTRACT

Woody flora of cloud forest (BMM) in Tamaulipas has different taxa with respect to other BMM in Mexico. Consequently, wood anatomical characters of its species can also express this variability, related to environment and the lineages to which they belong. In this paper, wood anatomy of 12 species growing in of the BMM at “El Cielo” Biosphere reserve in Tamaulipas, Mexico was described. Unlike other Mexican BMM, results showed a positive trend with respect to the presence of conspicuous growth rings. This character seems related to the geographical position of this BMM in Mexico. Other characters such as diffuse porosity, tangential vessels diameter < 100 µm, vessel elements with helical thickenings and length >350 µm, fibers lengths > 900 µm, and scarce axial parenchyma, are common features in the species studied. Some anatomical characters of taxa were compared with related groups at the genus or family level.

KEY WORDS: comparative anatomy, growth rings, scalariform perforation plates, diffuse porosity, Biosphere reserve “El Cielo”, secondary xylem.

INTRODUCCIÓN

El bosque mesófilo de montaña (BMM) tiene una distribución restringida en México, pues solo representa 0,44% del territorio nacional en condiciones de bosque primario (Challenger, 1998; Luna *et al.*, 1999; Challenger y Soberón, 2008). Sin embargo, la altitud, la humedad, la temperatura y la evapotranspiración real anual

generan una elevada riqueza de especies leñosas en este tipo de vegetación, conociéndose aproximadamente 1050 entre árboles y arbustos (Rzedowski, 1996; López-Mata *et al.*, 2012). Aunque algunas de ellas son indicadoras de este tipo de vegetación, son numerosas las especies leñosas que pueden variar de una localidad a

otra (Villaseñor, 2010). En consecuencia, las características anatómicas de la madera reflejan tal diversidad cuando se estudian floras regionales. Dicha variación corresponde con los linajes a los cuales las especies pertenecen, así como con diferencias asociadas con la latitud y la altitud, esto es, con la precipitación y la temperatura, entre otras. Tendencias en los caracteres anatómicos de las maderas cuyas especies crecen en ambientes mesofíticos, se han estudiado bajo un contexto florístico fuera de México (Versteegh, 1968; Carlquist, 1977; Guthrie, 1989). En el país se registran principalmente estudios descriptivos macroscópicos y/o microscópicos de la madera de especies aisladas provenientes de diferentes BMM (Carmona, 1979; Barajas-Morales, 1980; De la Paz-Pérez, 1980; De la Paz Pérez y Carmona, 1980; De la Paz-Pérez *et al.*, 1982; Quintanar *et al.*, 1996; López, 1997). Aguilar-Rodríguez *et al.* (2000), describen la madera de varias especies leñosas de un BMM, cuyos resultados sirvieron como preámbulo para llevar a cabo un análisis anatómico-florístico sobre tendencias relacionadas con el ambiente (Aguilar-Rodríguez y Barajas-Morales, 2005). Aguilar-Rodríguez y Castro-Plata (2006) aportan información y discuten sobre los caracteres anatómicos de la madera de especies leñosas procedentes de varias localidades de BMM del Estado de México. Para la Reserva de la Biósfera “El Cielo” en Tamaulipas, López y Ortega (1989) describen tres especies y Bárcenas-Pazos *et al.* (2005) relacionan estadísticamente las características anatómicas con propiedades físicas y algunas propiedades mecánicas de cuatro especies.

La Reserva de la Biósfera “El Cielo”, tiene una extensión de 100 km² (16 142,86 ha, Conabio, 2010), conociéndose para el BMM de esta zona 68 especies entre árboles y arbustos (Puig, 1993). Si se registran los estudios sobre anatomía de la madera de especies que se comparten con otras localidades, apenas se alcanza 15% del total de los taxa inventariados en el BMM de “El Cielo”. Con lo anterior es evidente que escasamente se conoce sobre las maderas de especies que habitan el BMM más norteño del país.

OBJETIVO

Dar a conocer la diversidad del xilema secundario de doce especies que habitan en el bosque mesófilo de la Reserva de la Biósfera “El Cielo”, Tamaulipas, analizar las tendencias generales de algunos caracteres y comparar con otros obtenidos para las mismas especies, o con aquellas que se relacionan taxonómicamente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

De acuerdo con Puig (1993), el BMM de “El Cielo” en Tamaulipas se localiza en el sur del estado, en la Sierra de Cucharas, localizada sobre la vertiente E de la Sierra Madre Oriental. Alcanza los municipios de Gómez Farías, Jaumave y Llera. Encuentra sus límites entre los paralelos 23° 12' N y 23 °03' S y el meridiano 99° 18' O. Se localiza en un intervalo altitudinal entre los 800 m y 1500 m, abarcando un área de 100 km². Se desarrolla principalmente en el interior de cañadas húmedas que contienen una humedad relativa alta (90% de saturación). La temperatura media anual oscila entre 13,8 °C y 22,8 °C, con una precipitación media anual entre 2522,4 mm y 1852 mm. El número de meses secos es de 0 a 4.

Trabajo de campo

El material de estudio se colectó dentro de la Reserva de la Biósfera “El Cielo” en la región de Gómez Farías, Tamaulipas, México (Tabla 1). De cada una de las especies se seleccionaron dos individuos maduros, sanos y de tallos rectos; se obtuvieron algunos datos como altura del individuo y diámetro a la altura del pecho (DAP) del tronco (Tabla 1). Empleando un serrote, se obtuvieron dos trozas pequeñas de madera del tronco principal, a una distancia de 1,30 cm del suelo para árboles y a nivel del suelo para los arbustos. En todos los caso se incluyó la corteza. Se colectó material para el herbario con flores y/o frutos de los mismos individuos de los que se tomó la muestra de madera. Los ejemplares herborizados se determinaron con claves especializadas y se depositaron en el herbario de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala (IZTA) como material de referencia.

TABLA 1. Lista de especies organizadas por familia, características de los individuos colectados y números de colecta de 12 especies del BMM de la Reserva de la biósfera “El Cielo”, Tamaulipas, México. Todos los números corresponden a S. Aguilar.

Familia	Nombre científico	Forma de vida, Altura (m) / diámetro (cm)	Núm./ind.
CELASTRACEAE	<i>Wimmeria concolor</i> Schltdl. & Cham	Árbol, 4 / 6	306/a,b
CLETHRACEAE	<i>Clethra pringlei</i> S. Watson.	Árbol, 5 / 20	295/a,b
LAURACEAE	<i>Nectandra sanguinea</i> Rol. ex Rottb.	Árbol, 6 / 10	305/a,b
FABACEAE	<i>Acacia angustissima</i> (Mill.) Kuntze	Árbol, 8 / 15	303/a,b
FABACEAE	<i>Cercis canadensis</i> L.	Árbol, 8 / 11	302/a,b
MAGNOLIACEAE	<i>Magnolia schiedeana</i> Schltdl.	Árbol, 12 / 22	299/a,b
OLEACEAE	<i>Osmanthus americanus</i> (L.) Benth. & Hook. f. ex A. Gray	Árbol, 3 / 6	297/a,b
PIPERACEAE	<i>Piper amalago</i> L.	Arbusto, 3 / 4	307/a,b
RUBIACEAE	<i>Chione venosa</i> var. <i>mexicana</i> (Standl.) David W. Taylor	Árbol, 6 / 20	301/a,b
RUTACEAE	<i>Decatropis bicolor</i> (Zucc.) Radlk.	Árbol, 5 / 8	296/a,b
RUTACEAE	<i>Zanthoxylum hidalgense</i> Lundell	Árbol, 10 / 22	300/a,b
SCROPHULARIACEAE	<i>Buddleja cordata</i> Kunth	Árbol, 3 / 10	298/a,b

Trabajo de laboratorio

Se cortaron dos cubos de madera de 2 cm a 3 cm de lado, procedentes de la troza que se separó del tallo principal. Los cubos se obtuvieron de la albura y se ablandaron en solución GAA (una parte de glicerina, dos partes de alcohol y tres partes de agua destilada) durante 10 a 15 días. Después las muestras se cortaron a 20 µm ó 30 µm de grosor con un micrótopo de deslizamiento en los planos transversal, tangencial y radial. Los cortes previamente lavados con agua destilada, se tiñeron en una solución acuosa de safranina al 1% hasta adquirir una coloración intensa. Después de la tinción, se sometieron a una deshidratación gradual a partir del alcohol de 70% hasta

absoluto, se aclararon con xilol y se montaron un corte de cada plano en un portaobjetos, utilizando resina sintética (Johansen, 1940). Los disociados se obtuvieron empleando la solución de Jeffrey (Berlyn y Miksche, 1976) y solo se elaboraron preparaciones temporales para cuantificar la longitud de fibras y elementos de vaso. Las descripciones microscópicas se realizaron de acuerdo con lo recomendado por la Asociación Internacional de Anatomistas de la Madera (IAWA Committee, 1989). Para calificar la longitud y grosor de pared de fibras se tomaron los criterios del IAWA Committee (1937) y de Chattaway (1932). El parénquima radial se clasificó de acuerdo con el criterio de Kribs (1935).

TABLA 2. Características de los anillos de crecimiento (AC), porosidad (Po), agrupación de vasos y vasos por mm² (AV/Vmm²), de 12 especies del BMM de la Reserva de la biósfera “El Cielo”, Tamaulipas, Méx. C= conspicuos; D= difusa; SA= semianular; A= anular; Solit.= solitarios; °= vasos de contorno redondeado; ◇ = vasos de contorno anguloso; □ = Ligeramente anguloso.

<i>Especie</i>	AC	<i>Características de los anillos de crecimiento</i>		Po	AV/Vmm ²
<i>Wimmeria concolor</i>	C	Banda de fibras que se engrosan gradualmente en la madera tardía		D°	Solit./58
<i>Clethra pringlei</i>	C	Banda angosta de 2 a 4 hileras de fibras con las paredes gruesas y comprimidas radialmente en la madera tardía		D°	Solit, múltiples radiales 2-4 (6)/139
<i>Nectandra sanguinea</i>	C	Banda de 1 a 3 hileras de fibras de ancho comprimidas radialmente en la madera tardía.		D°	Solit., múltiples radiales 2-3, escasos en racimos/14
<i>Acacia angustissima</i>	C	Vasos de menor diámetro en la madera tardía que los de la madera temprana y por una banda más o menos continua de parénquima marginal en la madera tardía.		SA/A°	Solit., múltiples radiales 2 o 3 (4), escasos en racimos/18
<i>Cercis canadensis</i>	C	Vasos de menor diámetro en la madera tardía que los de la madera temprana y por una banda angosta de 1 a 3 células de parénquima marginal y fibras con las paredes comprimidas radialmente.		SA°	Solit., múltiples radiales 2-3/67
<i>Magnolia schiedeana</i>	C	Parénquima marginal en bandas de más de cuatro células de ancho.		D°	Solit., múltiples radiales 2-3(6), escasos en racimos/66
<i>Osmanthus americanus</i>	C	2-5 hileras de células de parénquima marginal y dos hileras de fibras con paredes engrosadas.		D	Solit.,grupos hasta de 4, patrón de distribución dendrítico
<i>Piper amalago</i>	Ausentes	Ausentes	D°	Solit., múltiples radiales 2-3/33	
<i>Chione venosa var. mexicana</i>	C	Banda angosta de 2 a 4 (8) hileras de fibras con las paredes gruesas, comprimidas radialmente en la madera tardía y con pocas células de parénquima axial entre ellas.		D°	Solit., múltiples radiales 2-3(7), escasos racimos/116
<i>Decatropis bicolor</i>	C	Banda de fibras con paredes engrosadas que se atenúan gradualmente hacia la madera temprana.		D°	Solit., múltiples radiales 2-4(7), escasos racimos/71
<i>Zanthoxylum hidalgense</i>	C	Banda de 2 a 5 hileras de fibras con paredes algo engrosadas y vasos de menor diámetro en la madera tardía, en algunos casos esta zona se evidencia además por un número mayor de vasos.		D°	Solit., múltiples radiales 2-3/58
<i>Buddleja cordata</i>	C	Banda angosta de 2 a 5 hileras de fibras de ancho con las paredes comprimidas radialmente en la madera tardía.		SA/A°	Solit., múltiples radiales 2-3(8), escasos racimos/51

RESULTADOS

Las características microscópicas de las 12 especies estudiadas se resumen en las tablas 2-6 y en la figuras 1-4. Ambas se ordenaron por familia y especie y con base en W3 Trópicos (<http://www.tropicos.org/>).

Anillos de crecimiento (Tabla 2; Figs. 1,2,3,4). Fueron evidentes, marcados por bandas de 1 a 8 hileras de fibras con las paredes gruesas y/o comprimidas radialmente; *Chione venosa* var. *mexicana* fue la especie que presentó hasta ocho hileras de fibras con estas características (Fig. 3G). Las dos fabáceas *Acacia angustissima* y *Cercis canadienses*, así como *Magnolia schiedeana* y *Osmanthus americanus* presentaron parénquima axial marginal deli-

mitándolos. *Piper amalago* fue la única especie que no exhibió anillos de crecimiento (Fig. 3D).

Vasos (Tabla 3). La porosidad fue principalmente difusa; en *Cercis canadensis* la porosidad fue semianular y en dos especies se apreció una condición intermedia entre semianular a anular, pero en ninguna se mostró claramente anular. El diámetro de los vasos fue pequeño en 10 especies y mediano en dos, los valores fluctuaron entre 38 µm en *Clethra pringlei* a 128 µm en *Acacia angustissima*; ninguna de las especies estudiadas presentó vasos con diámetros mayores de 200 µm. Las dos fabáceas, además de *Osmanthus americanus* y *Piper amalago*, presentaron los elementos de vaso cortos, con una longitud que fluctúa

TABLA 3. Características cuantitativas y cualitativas de los elementos de vaso de 12 especies del BMM del área natural protegida “El Cielo”, Tamaulipas, Méx. S= simple; E= escalariforme; R= reticulada.

Especie	Diámetro del elemento de vaso (µm)	Longitud del elemento de vaso (µm)	Placa de perforación/ #de barras	Punteaduras intervasculares/ diámetro (µm)	Engrosamientos helicoidales
<i>Wimmeria concolor</i>	50 ± 3	442 ± 70	S	Alternas/2,5±0,5(2-3)	Tenues en todo el elemento de vaso
<i>Clethra pringlei</i>	38 ± 4	1075 ± 169	E, escasas R/35(27-42)	Opuestas/4±1(3-5)	Exclusivamente en las lúgulas
<i>Nectandra sanguinea</i>	114 ± 10	486 ± 96	S,E/3(1-6)	Alternas/9±1(7-10)	-----
<i>Acacia angustissima</i>	128 ± 13	310 ± 31	S	Alternas/7±1(6-8)	-----
<i>Cercis canadensis</i>	71 ± 8	258 ± 24	S	Alternas/7±1(7-7)	En todo el elemento de vaso
<i>Magnolia schiedeana</i>	64 ± 5	872 ± 104	E/7(5-9)	Escalariformes/32±5 (20-39)	Tenues en todo el elemento de vaso
<i>Osmanthus americanus</i>	46 ± 5	315 ± 65	S	Alternas/10±1(8-11)	En todo el elemento de vaso
<i>Piper amalago</i>	68 ± 5	241±49	S	Alternas/2±0,5 (1,5-2,5)	-----
<i>Chione venosa</i> var. <i>Mexicana</i>	48 ± 3	812 ± 204	S	Alternas/5±1(4-6)	-----
<i>Decatropis bicolor</i>	50 ± 8	449 ± 60	S	Alternas/7±1(6-8)	En todo el elemento de vaso
<i>Zanthoxylum hidalgense</i>	97 ± 10	477 ± 71	S	Alternas/8±1(7-9)	-----
<i>Buddleja cordata</i>	83 ± 16	366 ± 50	S	Alternas/7±1(6-8)	En todo el elemento de vaso



FIGURA 1. Caracteres anatómicos de las maderas en vistas transversales, tangenciales y radiales. A-D. Celastraceae: *Wimmeria concolor*. E-H. Clethraceae: *Clethra pringlei*, con detalle de placa de perforación reticulada-escalariforme (H). I-L. Lauraceae: *Nectandra sanguinea*, con detalle de células de aceite y/o mucílago (K).

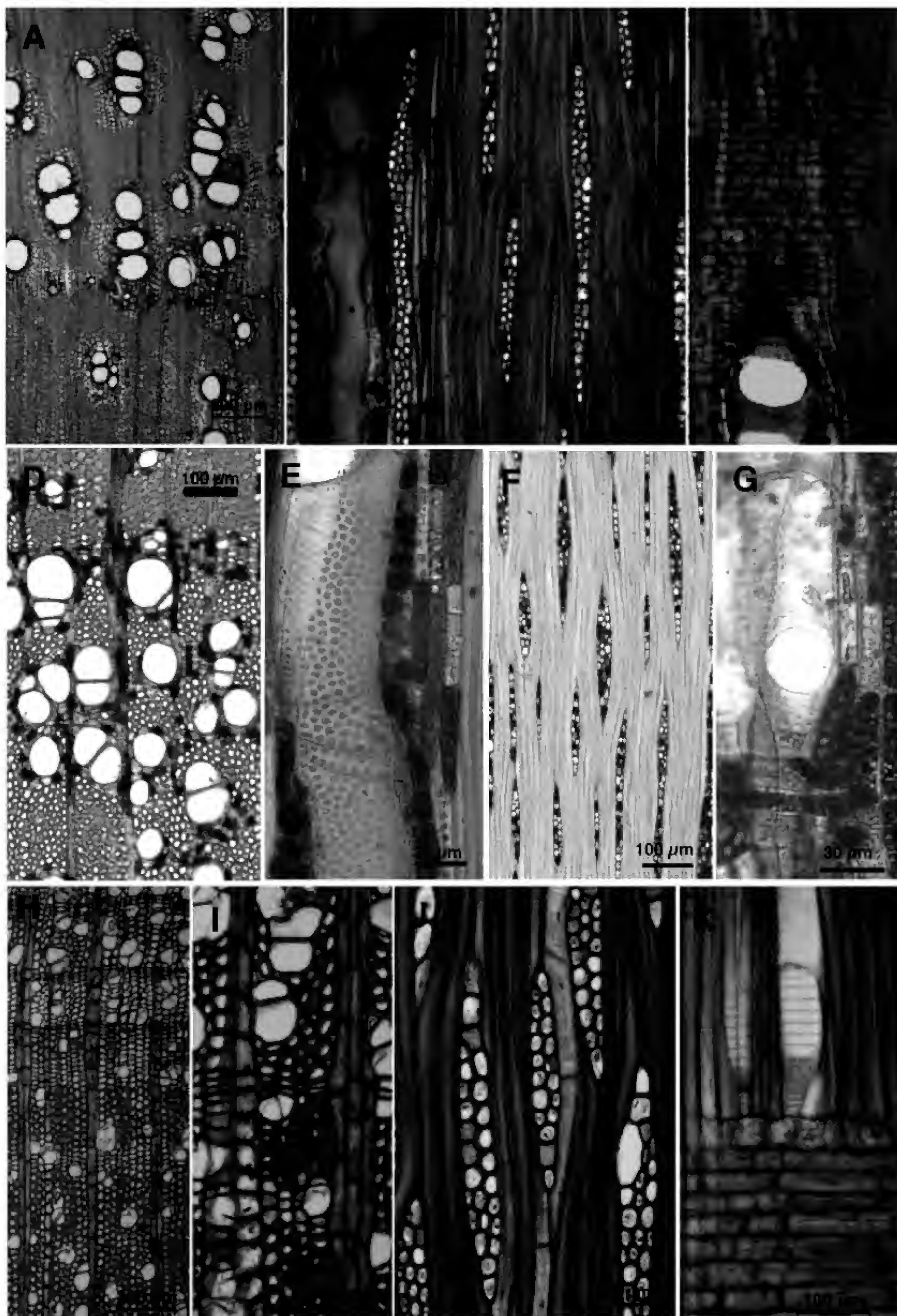


FIGURA 2. Caracteres anatómicos de las maderas en vistas transversales, tangenciales y radiales. A-G. Fabaceae: A-C. *Acacia angustissima*. D-G. *Cercis canadensis*. H-K. Magnoliaceae: *Magnolia schiedeana*, con detalle de célula de aceite en radio (J).

TABLA 4. Características cualitativas y cuantitativas de las fibras de 12 especies del BMM de la Reserva de la biósfera “El Cielo”, Tamaulipas, México. C= cortas; M= medianas; L= largas.

<i>Especie</i>	<i>Longitud</i> (μm)		<i>Diámetro</i> (μm)	<i>Grosor de pared</i> (μm)	<i>Otros</i>
<i>Wimmeria concolor</i>	961 \pm 118	(M)	17 \pm 2	5 \pm 1	Punteaduras areoladas
<i>Clethra pringlei</i>	1731 \pm 235	(L)	26 \pm 2	3 \pm 1	Punteaduras areoladas evidentes
<i>Nectandra sanguinea</i>	982 \pm 80	(M)	18 \pm 2	3 \pm 1	Punteaduras simples
<i>Acacia angustissima</i>	785 \pm 36	(C)	16 \pm 2	3 \pm 1	Punteaduras simples, septadas.
<i>Cercis canadensis</i>	1279 \pm 138	(M)	18 \pm 2	4 \pm 1	Punteaduras simples, septadas
<i>Magnolia schiedeana</i>	1621 \pm 141	(L)	30 \pm 3	5 \pm 1	Punteaduras areoladas pequeñas
<i>Osmanthus americanus</i>	1025 \pm 126	(M)	22 \pm 2	7 \pm 1	Punteaduras simples
<i>Piper amalago</i>	788 \pm 89	(C)	16 \pm 1	4 \pm 0,5	Punteaduras simples
<i>Chione venosa</i> var. <i>mexicana</i>	1385 \pm 182	(M)	23 \pm 2	5 \pm 1	Punteaduras areoladas
<i>Decatropis bicolor</i>	898 \pm 98	(C)	10 \pm 1	4 \pm 1	Punteaduras simples
<i>Zanthoxylum hidalgense</i>	914 \pm 67	(M)	21 \pm 2	3 \pm 1	Punteaduras simples
<i>Buddleja cordata</i>	854 \pm 65	(C)	34 \pm 2	7 \pm 1	Punteaduras simples, fibras nucleadas.

TABLA 5. Características del parénquima axial de 12 especies del BMM del área natural protegida El Cielo, Tamaulipas, México.

<i>Especie</i>	<i>Parénquima axial</i>
<i>Wimmeria concolor</i>	En bandas tangenciales anchas de 5 a 10 hileras de células de grosor. Series de más de 8 células por segmento
<i>Clethra pringlei</i>	Paratraqueal escaso y apotraqueal difuso. Series de 6-10 células por segmento
<i>Nectandra sanguinea</i>	Paratraqueal vasicéntrico y apotraqueal difuso. Series de 4-9 células por segmento
<i>Acacia angustissima</i>	Paratraqueal vasicéntrico formando vainas anchas, aliforme y aliforme confluyente, en bandas marginales de 2-3 células de ancho asociadas al anillo de la madera tardía. Series de 2-3 células
<i>Cercis canadensis</i>	Paratraqueal vasicéntrico confluyente y marginal de 1-3 hileras de ancho. Series de 2-4 células por segmento
<i>Magnolia schiedeana</i>	Apotraqueal marginal en bandas de más de cuatro células de ancho. Con series de 2-4 células por segmento
<i>Osmanthus americanus</i>	Paratraqueal escaso y marginal de 2-5 células de ancho. Series de 2-4 células por segmento
<i>Piper amalago</i>	Paratraqueal escaso. Series de 2 células por segmento
<i>Chione venosa</i> var. <i>mexicana</i>	Paratraqueal escaso y difuso en agregados y apotraqueal difuso. Series de 4-8 células por segmento
<i>Decatropis bicolor</i>	En bandas angostas de 3-5 células de ancho. Series de 8 células por segmento
<i>Zanthoxylum hidalgense</i>	Paratraqueal escaso y vasicéntrico. Series de 2-4 células por segmento
<i>Buddleja cordata</i>	Apotraqueal difuso y paratraqueal escaso. Series de 2-6 células por segmento

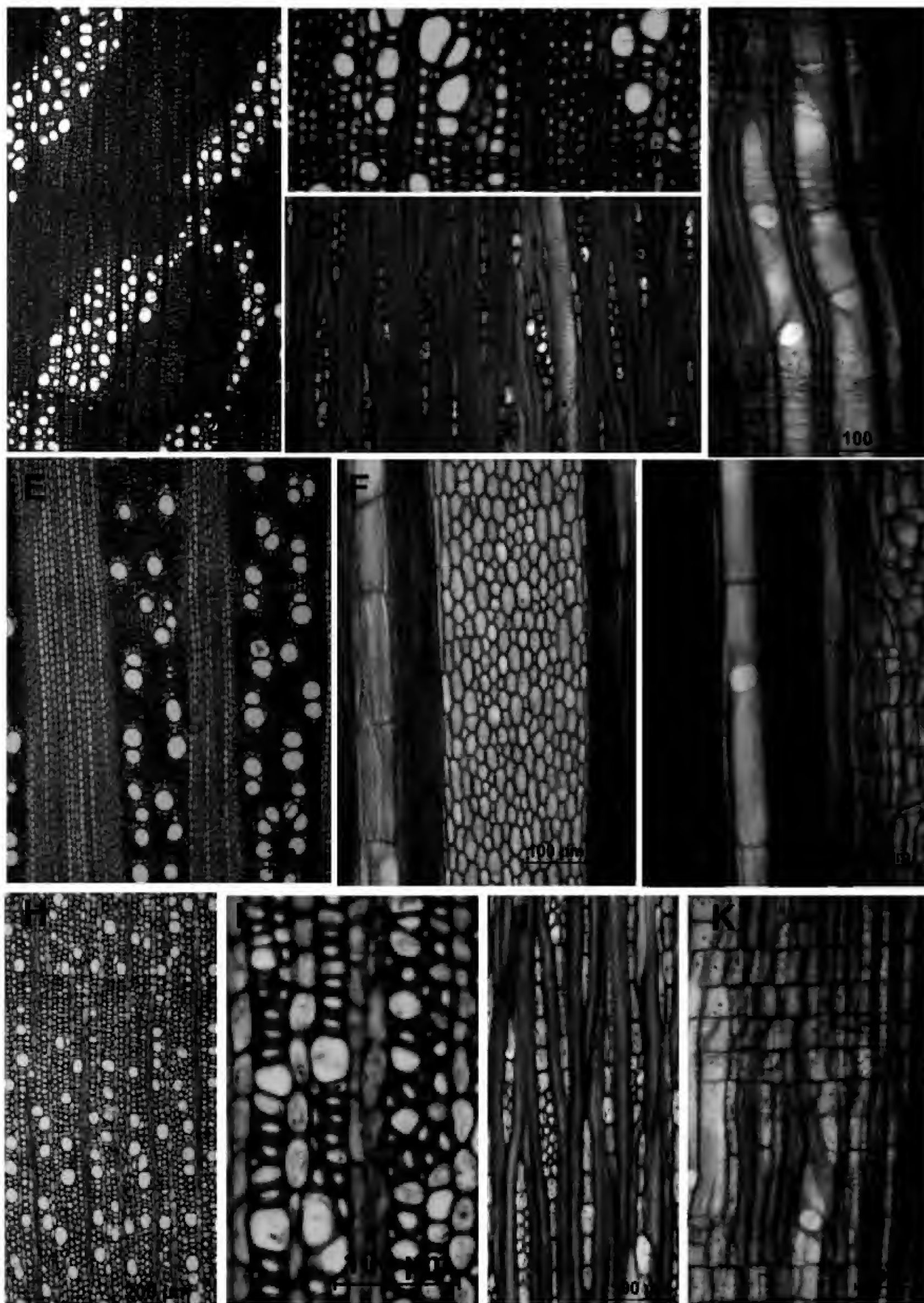
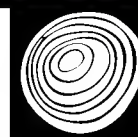


FIGURA 3. Caracteres anatómicos de las maderas en vistas transversales, tangenciales y radiales. A-D. Oleaceae: *Osmanthus americanus*. E-G. Piperaceae: *Piper amalago*. H-K. Rubiaceae: *Chione venosa* var. *mexicana*.

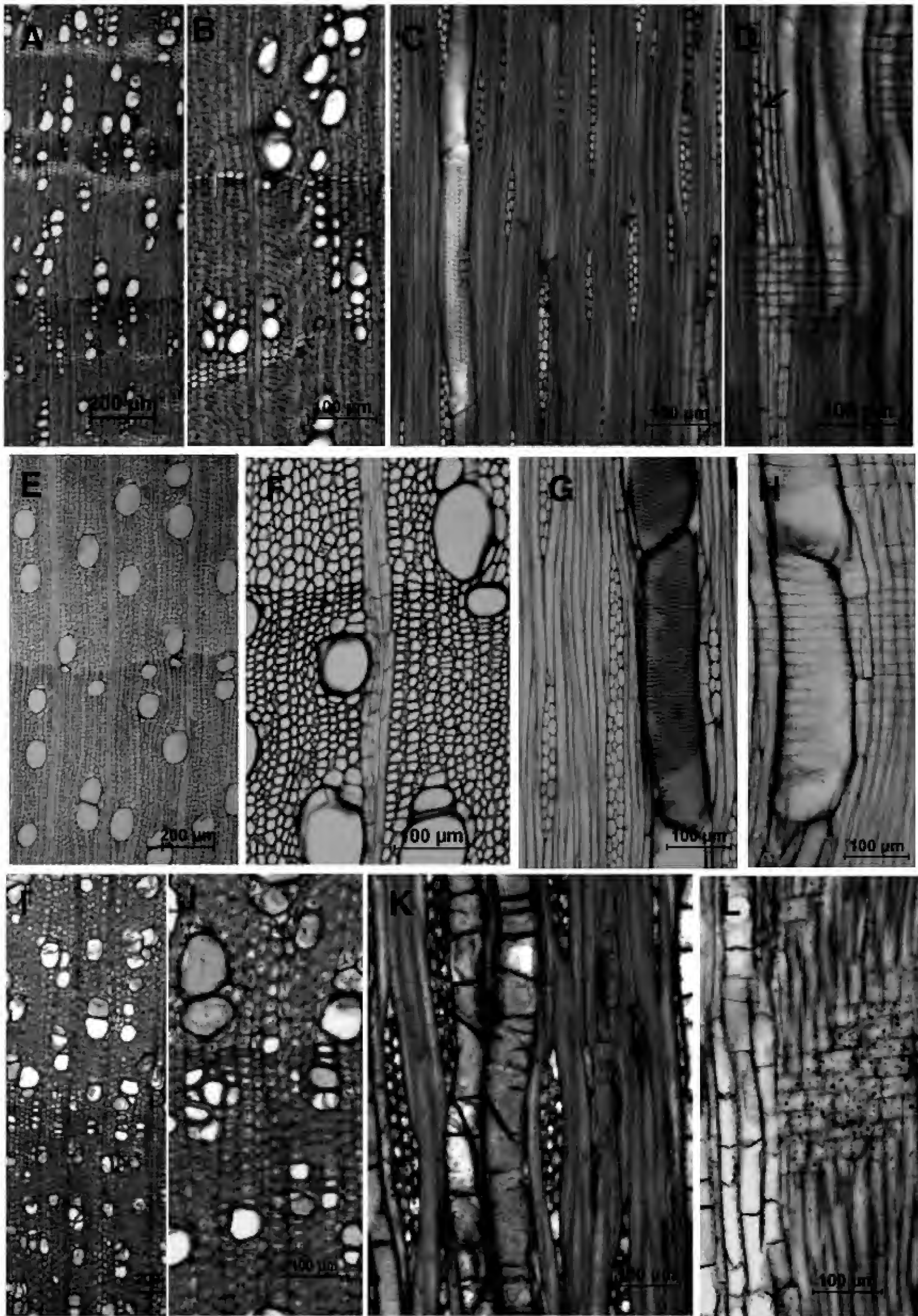


FIGURA 4. Caracteres anatómicos de las maderas en vistas transversales, tangenciales y radiales. A-H. Rutaceae: A-D. *Decatropis bicolor*, la flecha señala cristales prismáticos en células de parénquima axial (D). E-H *Zanthoxylum hidalgense*. I-L. Scrophulariaceae: *Buddleja cordata*.

TABLA 6. Características del parénquima radial de 12 especies del BMM de la Reserva de la biósfera “El Cielo”, Tamaulipas, México.

Especie	Parénquima radial			
	Tipo	Uniseriados	Multiseriados/ altura	
Wimmeria concolor	Heterogéneo IIA	385 ± 72 células procumbentes	Biseriados 284 ± 41	
Clethra pringlei	Heterogéneo IIA	631 ± 88 células erectas	(2)3 a 5 células 736 ± 99	
Nectandra sanguinea	Heterogéneo IIB	escasos	2-3 células/ 405 ± 34	con células de aceite y/o mucílago
Acacia angustissima	Heterogéneo IIB	246 ± 43 células procumbentes	2-3 células/ 524±71	
Cercis canadensis	Heterogéneo IIB	182 ± 21 células procumbentes	2-4 células/ 387 ± 46	
Magnolia schiedeana	Heterogéneo IIB	206 ± 33 células procumbentes	2-3 células/ 602 ± 60	Con células de aceite
Osmanthus americanus	Heterogéneo IIB	236 ± 30 células procumbentes	Biseriados/ 270 ± 39	
Piper amalago	18 ± 4 células de ancho y 289 ± 80 µm; radios excepcionalmente altos, se extienden a lo largo del entrenudo; compuestos de células cuadradas y erectas, con algunas células procumbentes dispersas entre éstas.			
Chione venosa var. mexicana	Heterogéneo IIA	476 ± 40 células cuadradas o erectas	2-3 células/ 628 ± 280	
Decatropis bicolor	Heterogéneo IIB	197 ± 32 células procumbentes	Biseriados/ 254 ± 24	
Zanthoxylum hidalgense	Heterogéneo IIB	174 ± 43 célulasprocumbentes	2-3 (4) células/ 469 ± 62	
Buddleja cordata	Heterogéneo IIB	353 ± 71 células cuadradas o erectas	2-3 (4) células 519 ± 102	

entre 241 µm y 315 µm; mientras que cinco especies mostraron valores medianos, con 366 µm (en *Buddleja cordata*) a 486 µm (en *Nectandra sanguinea*); *Chione venosa* var. *mexicana* (812 µm), *Magnolia schiedeana* (872 µm) y *Clethra pringlei* (1075 µm) presentaron los elementos de vaso más largos. Las placas de perforación fueron de dos

tipos, simples en nueve especies y escalariformes en tres (Figs. 2L, 4H); en *Clethra pringlei* además de las placas escalariformes, se observaron placas con perforación reticulada (Fig. 1H). Las punteaduras intervasculares alternas predominaron, excepto en *Clethra pringlei* y *Magnolia schiedeana* que las tuvieron escalariformes (Fig. 2K). Siete

especies (58%) presentaron engrosamientos helicoidales (Fig. 2E); seis a lo largo de todo el elemento de vaso y en *Clethra pringlei* exclusivamente en las lúgulas. En *Wimmeria concolor* y *Magnolia schiedeana* los engrosamientos fueron tenues y solo están presentes en algunos vasos.

Fibras (Tabla 4). Más de la mitad de las especies (8) presentaron fibras con punteaduras simples, en los otros cuatro taxa las fibras mostraron punteaduras areoladas. Únicamente *Cercis canadensis* presentó fibras septadas. En seis especies las fibras tuvieron longitudes medianas (de 914 µm – 1385 µm), en cuatro fueron cortas y los valores más pequeños los tienen *Acacia angustissima* y *Piper amalago*, con promedios de 785 µm y 788 µm respectivamente; las fibras más largas se registraron en *Magnolia schiedeana* (1621 µm) y en *Clethra pringlei* (1731 µm). En nueve de las 12 especies estudiadas las paredes de las fibras fueron delgadas, mientras que en el resto se presentaron gruesas.

Parénquima. El parénquima axial fue escaso a regular y se organiza de diferentes formas (Tabla 5), observándose apotraqueal y/o paratraqueal en la mayoría de las especies, excepto en *Decatropis bicolor* y *Wimmeria concolor* que presentaron parénquima bandeado, angosto (formado por 3 a 5 hileras de células) y ancho (de 5 a 10 hileras de células), respectivamente (Figs. 1A, 4A y 4B); además *D. bicolor* exhibió cristales prismáticos en cámaras dentro de las células (Fig. 4D). En el caso de los radios fueron heterogéneos tipo IIB en ocho especies y heterogéneos tipo IIA en tres (Tabla 6); solo en *Piper amalago* se mostraron extremadamente altos y anchos (Figs. 3D y 3E), por lo que no entran en ninguna de las categorías propuestas por Kribs (1935).

DISCUSIÓN

Comparación anatómica entre las especies estudiadas

Con excepción de *Buddleja cordata*, *Magnolia schiedeana* y *Zanthoxylum hidalguense*, no se tiene registro de

estudios anatómicos de la madera de nueve de las especies estudiadas (Aguilar-Rodríguez *et al.*, 2006; Arenas *et al.*, 2012; López y Ortega, 1989).

Al parecer algunos caracteres como los anillos de crecimiento pueden estar relacionados con la posición geográfica de esta comunidad, que constituye el límite más norteño del BMM en México (Acosta, 2004). Por ejemplo, en la zona de estudio, 92% de las especies mostró anillos de crecimiento evidentes, mientras que aquellas que se desarrollan hacia el centro del país generalmente no los presentan (Aguilar-Rodríguez y Barajas-Morales, 2005). Aguilar-Rodríguez y Castro-Plata (2006) registran que solamente 38% de las especies de un BMM en el Estado de México, forman anillos de crecimiento. Analizando lo anterior parece que las especies tienden a formarlos conforme la latitud aumenta; sin embargo, es necesario que se realicen más estudios, que apoyen este supuesto. La respuesta que se ha observado en una sola especie, o grupo taxonómico de amplia distribución, es que las especies/poblaciones más boreales, tienden a formar anillos de crecimiento, así como porosidades anulares (Aguilar-Rodríguez *et al.*, 2006; Noshiro y Baas, 2000). Es sabido que los anillos de crecimiento se relacionan con el clima y con la latitud, reconociendo que conforme esta última aumenta, un mayor número de especies los presentan (Metcalf y Chalk, 1983); igualmente podría ser una respuesta asociada con las modificaciones del fotoperiodo. Entender el comportamiento de los anillos crecimiento en especies locales es una inquietud actual que se relaciona con el impacto que el hombre ha tenido sobre la vegetación y, por lo tanto, con el cambio climático (Somaru-Ram *et al.*, 2008). Bajo este contexto, las especies del BMM que forman anillos de crecimiento, potencialmente podrían ser empleadas en reconstrucciones climáticas regionales.

Contrario a lo que se observa en latitudes mayores, en 75% de los taxa analizados aquí, la porosidad es difusa. Aunque este porcentaje es menor que el registrado para el centro de México (Aguilar-Rodríguez y Barajas-Morales, 2005; Aguilar-Rodríguez y Castro Plata, 2006), no se reconoció porosidad anular en ninguna de las especies,



apreciándose solo una continuidad entre semianular-anular en *A. angustissima* y *Buddleja cordata*. La ausencia de maderas con porosidad anular concuerda con otros estudios al señalar que es común que en ambientes en donde no existe estacionalidad marcada predominen especies con porosidad difusa (Alves y Angyalossy-Alfonso, 2000; Woodcock *et al.*, 2000). Otras tendencias en los caracteres como son vasos con diámetro pequeño ($< 100 \mu\text{m}$), longitudes de los elementos de vaso mayores a $350 \mu\text{m}$ (hasta $1075 \mu\text{m}$ en *Clethra pringlei*), fibras con longitudes mayores de $900 \mu\text{m}$, paredes delgadas y lúmenes amplios; parénquima axial escaso y los radios heterogéneos tipo IIB y IIA, así como la presencia de engrosamientos helicoidales y placas de perforación escalariforme, e incluso reticulada (en algunos vasos de *C. pringlei*), parecen ser comunes en las especies de los BMM mexicanos (Aguilar-Rodríguez y Barajas-Morales, 2005; Aguilar-Rodríguez y Castro-Plata, 2006). Varios de ellos se han reconocido como caracteres retenidos con tendencia a presentarse en especies que habitan bosques tropicales de montaña o zonas mesofíticas (Baas, 1983; Versteegh, 1968; Wheeler y Baas, 1993). Para confirmar las diferencias discutidas, se deben realizar estudios en México que abarquen mayor número de especies, así como más localidades de BMM a lo largo de su distribución latitudinal.

Se menciona que debido a la homogeneidad del ambiente, los caracteres anatómicos de la madera de algunas especies típicas del BMM, como las Clethraceae, pueden no presentar correlación evidente con la latitud o altitud (Giebel y Dickison, 1976). Sin embargo, algunos de los ejemplos citados en este trabajo parecen indicar que no siempre es así.

Comparación anatómica de las especies estudiadas con taxa afines

Los caracteres anatómicos de la madera pueden determinar a las especies o grupos de ellas; entender la diversidad de tales atributos contribuye al esclarecimiento de relaciones taxonómicas a diferentes niveles jerárquicos de la clasificación. En este sentido algunos caracteres de las especies aquí estudiadas se comparan con lo encontrado

en otros trabajos realizados a nivel de especie, género y/o familia.

Para las Celastraceae se han encontrado maderas con vasos pequeños, solitarios y muy numerosos condición presente en *Wimmeria concolor*. Sin embargo, la porosidad anular a semi-anular registrada en la familia difiere de la porosidad difusa observada en la especie estudiada. Los engrosamientos helicoidales señalados como ocasionales en las Celastraceae se presentan en *W. concolor*. El parénquima axial es muy variable a nivel de género y aun entre especies de *Wimmeria*, por lo que puede ser utilizado como carácter taxonómico. Los radios biseriados observados en *W. concolor*, se mencionan para el género. En general los radios angostos (uni y biseriados) parecen ser la condición típica en las Celastraceae (Metcalf y Chalk, 1950).

La madera de *Clethra pringlei* presenta atributos propios de las Clethraceae, los cuales se mencionan como uniformes para la familia (Giebel y Dickison, 1976). Ellos están relacionados con elementos de vaso solitarios, de contorno angular, largos y con diámetro tangencial menor a $100 \mu\text{m}$, así como con la presencia de fibrotraqueidas, radios heterogéneos y parénquima axial escaso. Generalmente se han encontrado anillos de crecimiento apenas evidentes y delimitados por fibrotraqueidas con paredes gruesas; para *C. pringlei* se reconocen de manera similar todos estos rasgos anatómicos. Sin embargo, los anillos de crecimiento no siempre son evidentes, como es el caso de *C. mexicana* (Aguilar-Rodríguez *et al.*, 2000; De la Paz Pérez y Quintanar 1994; Ortega *et al.*, 1988). Giebel y Dickison (1976) mencionan que para especies tropicales se encuentran ausentes. La presencia/ausencia de células envainantes de los radios, así como los engrosamientos helicoidales, finos o prominentes, en las lúgulas de los elementos de vaso, podrían considerarse de valor taxonómico en el género. Los caracteres cuantitativos de los elementos traqueales muestran diferencias entre especies, aunque muchos de ellos se superponen (Giebel y Dickison, 1976; Aguilar-Rodríguez *et al.*, 2000). Aspectos como el tamaño del individuo, el ambiente o el origen geográfico de los taxa pueden influir en la variación de estos caracte-

res. (Aguilar-Rodríguez y Barajas-Morales, 2005; Aguilar-Rodríguez *et al.*, 2006; Terrazas *et al.*, 2008).

La madera de *Nectandra sanguinea* comparte con otros miembros de las Lauraceae porosidad difusa, vasos ovalados, solitarios y agrupados en múltiples radiales de 2 a 4, punteaduras intervasculares alternas, parénquima paratraqueal y células de aceite/mucilaginosas en radios (Rohwer, 1993; Bernardino, 2012). Para diferenciar entre especies de *Nectandra*, caracteres como tipo de parénquima paratraqueal, presencia/ausencia de cristales aciculares o prismáticos en los radios, presencia de placas de perforación escalariforme, abundancia y localización de las células de aceite/mucilago y seriación de radios, pueden contribuir a diferenciarlas (Bernardino, 2012). Por ejemplo, para *N. sanguinea* no se observó ningún tipo de cristal.

Con respecto a las Fabaceae, la madera de *Acacia angustissima* muestra algunas similitudes con otras Mimosoideae (Camargo-Ricalde, 2000; Montaña-Arias *et al.*, 2013). Por ejemplo, presentan un contorno redondeado de los vasos que se arreglan solitarios y en múltiples radiales de dos y el tipo de parénquima axial que es paratraqueal vasicéntrico y en bandas. En el caso de *Cercis canadensis*, perteneciente a Caesalpinoideae, los radios uniseriados y multiseriados son muy cortos, además se observan engrosamientos helicoidales tenues en todo el elemento del vaso. Contrariamente, para *Cercis*, Metcalfe y Chalk (1950) describen radios muy largos y no mencionan la presencia de engrosamientos helicoidales en los vasos para alguna de las especies del género. No obstante, se reconoce que estos engrosamientos se presentan en otros géneros de Caesalpinoideae (Nair, 1987; Pujana *et al.*, 2011).

Los caracteres anatómicos de *Magnolia schiedeana* son similares a la descripción de López y Ortega (1989) para esta especie, así como para otras de distribución en Asia (Chen *et al.*, 1993). La porosidad difusa, placas de perforación y punteaduras intervasculares escalariformes, parénquima axial apotraqueal y paratraqueal escaso y marginal en bandas, además de células de aceite asociadas a parénquima radial, al parecer son caracteres constantes

en *Magnolia*. Caracteres como la proporción de placas de perforación simple/escalariforme, el tipo de radios heterogéneos/homogéneos y la presencia de posibles septos en las fibras, pueden distinguir entre especies del género (Metcalfe y Chalk, 1950).

Las Oleaceae presentan variación en su madera al presentar diferentes tipos de anillos de crecimiento, agrupaciones de vasos y parénquima axial. Aunque este último es principalmente paratarqueal, varía desde escaso hasta aliforme confluyente. Los radios tienden a ser angostos, generalmente de 2-3 células de ancho, aunque también se presentan los de cuatro células. Sin embargo, no se mencionan para la familia diámetros de vaso mayores a 100 μm (Baas *et al.*, 1988; Metcalfe y Chalk, 1950). La especie *Osmanthus americanus* estudiada aquí, sigue el patrón general publicado para el género al presentar anillos de crecimiento delimitados por células de parénquima marginal, porosidad difusa, contorno ligeramente angular de los vasos y el arreglo dendrítico de los mismos, así como la presencia de engrosamientos helicoidales a lo largo de todo el elemento de vaso. El tipo de punteaduras en fibras podría contribuir a la separación entre especies (Metcalfe y Chalk, 1950).

Piper amalago presenta caracteres típicos de Piperaceae, como son los radios anchos y extremadamente altos, pero de acuerdo con los valores que proporcionan Metcalfe y Chalk (1950), el número de células que conforman el ancho de los mismos varía considerablemente. En *P. amalago* los radios están formados por 12-26 células de ancho, mientras que para la familia se mencionan de 30 a 40. El número de vasos por milímetro cuadrado también difiere ampliamente, siendo mayor en *P. amalago* (33) que lo publicado para la familia (5-12; Metcalfe y Chalk, 1950).

En Rubiaceae se distinguen dos grandes tipos de madera, basados en la agrupación de vasos, así como en las características de fibras, parénquima axial y radial (Jansen *et al.*, 2002). La presencia de fibras con punteaduras areoladas, parénquima axial apotraqueal difuso y difuso en agregados y radios con márgenes uniseriados muy largos en *Chione venosa* var. *mexicana*, confirma



que esta especie presenta madera tipo Tipo I de Rubiaceae.

Los caracteres que pueden variar en *Decatropis bicolor* con respecto a otras Rutaceae se basan principalmente en el tipo de porosidad y en el tipo y seriación de radios, éstos últimos se presentan en la especie estudiada como uniseriados y biseriados (heterogéneos IIB); en relación con la seriación Metcalfe y Chalk (1950) mencionan que los radios en la familia pueden ser exclusivamente uniseriados o estar compuestos por 2 a 3 y hasta por más de seis series de ancho y heterogéneos tipo IIA. El caso de *Zanthoxylum hidalgense* las diferencias se basan en el tipo de porosidad y parénquima axial. En la especie estudiada, la porosidad es difusa a semianular y el parénquima axial paratraqueal escaso y vascicéntrico en vainas angostas. Mientras que la madera de esta misma especie en Querétaro se diferencia por la presencia de parénquima apotraqueal difuso y algunos caracteres cuantitativos (Arenas *et al.*, 2012). Por su parte, Metcalfe y Chalk (1950) reconocen para el género *Zanthoxylum* porosidad anular a semianular y parénquima axial en bandas terminales de 1-6 células de ancho.

Con respecto a la madera de *Buddleja cordata* se observó que la porosidad semianular/anular, corresponde a las poblaciones del centro-norte del país, como lo indican Aguilar-Rodríguez *et al.* (2006), quienes mencionan que en esta especie se expresa una gradación en la porosidad, observándose difusa en el sur y anular en los lugares secos y fríos de la República Mexicana. Al parecer los anillos de crecimiento en *B. cordata* también están relacionados con diferencias climáticas, por lo que su presencia/ausencia no puede considerarse un carácter taxonómico en la especie. Se reconoce para *B. cordata* la presencia de fibras nucleadas, ya que Aguilar-Rodríguez *et al.* (2006) no las refieren para ninguna de las poblaciones de *B. cordata* que ellos estudiaron. En general *Buddleja* muestra una estructura muy homogénea. Caracteres como los engrosamientos helicoidales en vasos, fibras septadas o vivas, parénquima axial escaso y radios heterogéneos tipo IIB, tienden a compartirse entre especies de *Buddleja* (Aguilar-Rodríguez y Terrazas, 2001).

CONCLUSIONES

La dominancia de maderas con anillos de crecimiento conspicuos parece estar relacionada con la ubicación del BMM al norte de México. Existen algunas similitudes en las tendencias observadas para otros BMM en México. Caracteres como: la porosidad difusa; elementos de vasos y fibras medianos y largos, vasos con diámetros menores a 100 µm, generalmente numerosos; con engrosamientos helicoidales, placas de perforación escalariforme y parénquima axial escaso (en la mitad de las especies), son atributos que se relacionan con ambientes húmedos de montaña.

La variedad en las características anatómicas de las maderas descritas aquí, corresponden con las familias y/o género a los que las especies pertenecen. Asimismo, reflejan la diversidad de los linajes estudiados. Las diferencias entre los taxa de un grupo afín pueden relacionarse con el tipo de anillos de crecimiento, la abundancia de los vasos, algunas de las características cualitativas y cuantitativas de sus elementos de vaso y fibras, así como con el parénquima axial y parénquima radial. Lo anterior puede atribuirse al ambiente, a la edad del individuo o al origen geográfico de las especies. Estudios sobre variabilidad anatómica de la madera a nivel intra-específico e inter-específico de los BMM de México permitirán esclarecer dichas variaciones.

REFERENCIAS

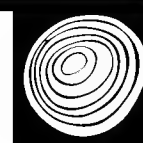
- Acosta, S. 2004. Afinidades de la flora genérica de algunos bosques mesófilos de montaña del nordeste, centro y sur de México: un enfoque fenético. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica* 75(1):61-72.
- Aguilar-Rodríguez, S., J. Barajas-Morales y J.D. Tejero-Díez. 2000. Anatomía de maderas de México: especies de un bosque mesófilo de montaña. Instituto de Biología. Publicaciones Especiales 17. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 87 p.
- Aguilar-Rodríguez, S. y J. Barajas-Morales. 2005. Anatomía de la madera de especies arbóreas de un bosque mesófilo de montaña: un enfoque ecológico-evolutivo. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 77:51-58.

- Aguilar-Rodríguez, S. y B.J. Castro-Plata. 2006. Anatomía de la madera de doce especies del bosque mesófilo de montaña del Estado de México. *Madera y Bosques* 12(1):95-115.
- Aguilar-Rodríguez, S., T. Terrazas y L. López-Mata. 2006. Anatomical wood variation of *Buddleja cordata* (Buddlejaceae) along its natural range in México. *Trees* 20:253-261.
- Aguilar-Rodríguez, S. y T. Terrazas. 2001. Anatomía de la madera de *Buddleja* L. (Buddlejaceae): análisis fenético. *Madera y Bosques* 7(2):63-85.
- Alves, S.E. y V. Angyalossy-Alfonso. 2000. Ecological trends in the wood anatomy of some brazilian species. 1. Growth rings and vessels. *IAWA Journal* 21(1):3-30.
- Arenas, F.F., A.R. Andrés-Hernández, T. Terrazas y C. Castañeda 2012. La madera de cinco especies de *Zanthoxylum* L. (Rutaceae) con distribución en México. *Madera y Bosques* 18(1):43-56.
- Baas, P. 1983. Ecological patterns in xylem anatomy. In: Givnish T.J., ed. On the economy of plant form and function. Cambridge University Press. Nueva York, EUA. p:327-352.
- Baas, P., P.M. Esser, M.E.T. Van Der Westen y M. Zandee. 1988. Wood anatomy of the Oleaceae. *IAWA Bulletin new series* 9:104-177.
- Barajas-Morales, J. 1980. Anatomía de maderas de México No. 3. Diez especies del bosque caducifolio de las cercanías de Xalapa, Veracruz. México. *Biotica* 5(1):23-40.
- Bárcenas-Pazos, G.M., F. Ortega-Escalona, G. Ángeles-Álvarez y P. Ronzón-Pérez. 2005. Relación estructura-propiedades de la madera de angiospermas mexicanas. *Universidad y Ciencia* 21(42):45-55.
- Berlyn, G.P. y J.P. Miksche. 1976. Botanical microtechnique and cytochemistry. Iowa State University Press. Iowa. 326 p.
- Bernardino, G.F. 2012. Anatomia do lenho de árvores de espécies de canela, *Ocotea* Aubl. e *Nectandra* Rol. ex Rottb. (Laureaceae) ocorrentes no Estado de Santa Catarina. Obtenção do título de Mestre. *Biologia Vegetal*, Centro de Ciências Biológicas. Universidade Federal de Santa Catarina. 114 p.
- Camargo-Ricalde, S.L. 2000. Descripción, distribución, anatomía, composición química y usos de *Mimosa tenuiflora* (Fabaceae-Mimosoideae) en México. *Revista de Biología Tropical* 48:939-954.
- Carlquist, S. 1977. Ecological factors in wood evolution: A floristic approach. *American Journal of Botany* 64(7): 887-896.
- Carmona, V.F.T. 1979. Características histológicas de la madera de cuatro especies del bosque caducifolio de México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. México. D.F. 170 p.
- Challenger, A. 1998. Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México: pasado, presente y futuro. Conabio-Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México y Agrupación Sierra Madre S.C., México, D.F. p:443-518.
- Challenger, A. y J. Soberón. 2008. Los ecosistemas terrestres de México. In: J. Soberón, G. Halffter y J. Llorente, eds. Capital Natural de México, Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. p:87-108.
- Chattaway, M.M. 1932. Proposed standards for numerical values used in describing woods. *Tropical Woods* 29:20-28.
- Chen, B.L., P. Baas, E.A. Wheeler y S. Wu. 1993. Wood anatomy of trees and shrubs from China. VI. Magnoliaceae. *IAWA Journal* 14(4):391-412.
- Conabio. 2010. El bosque mesófilo de montaña en México: amenazas y oportunidades para su conservación y manejo sostenible. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México D.F. 197 p.
- De La Paz-Pérez O., C. 1980. Estudio anatómico de la madera de 11 especies de angiospermas. Boletín Técnico del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. México. No. 64. 111 p.
- De La Paz-Pérez O., C. y A. Quintanar. 1994. Características anatómicas de la madera de cinco especies del estado de Jalisco, México. *Acta Botánica Mexicana* 27:75-87.
- De La Paz-Pérez O., C. y T.F. Carmona. 1980. Estudio anatómico de la madera de 43 especies tropicales. *Boletín Técnico del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales* 63:1-276.
- De La Paz-Pérez O., C., P. Olvera C y G. Corral L. 1982. Estudio anatómico de la madera de 26 especies de angiospermas de clima templado. *Boletín Técnico del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales* 91:1-126.



- Guthrie, L. R. 1989. Xylem structure and ecological dominance in a forest community. *American Journal of Botany* 76(8):1216-1228.
- Giebel, K. P. y W.C. Dickison 1976. Wood anatomy of Clethraceae. *The Journal of the Elisha Mitchell Scientific Society* 92:17-26.
- IAWA Committee. 1937. Committee on the standardization of terms of cell size. Standard terms of length of vessel members and wood fiber. *Tropical Woods* 51:21-220.
- IAWA Committee. 1989. IAWA list of microscopic features for hardwood identification. *IAWA Bulletin new series* 10(3):219-332.
- Jansen, S., E. Robbrecht, H. Beeckman y E. Smets. 2002. A survey of the systematic wood anatomy of the Rubiaceae. *IAWA Journal* 23(1):1-67.
- Johansen, J. 1940. Plant microtechnique. McGraw-Hill Book Company. Nueva York. 523 p.
- Kribs, D. A. 1935. Salient lines of structural specialization in the wood rays in dicotyledons. *Botanical Gazette* 96(3):547-557.
- López, M. S. 1997. Tendencias ecológicas en la estructura de la madera de árboles de un Bosque mesófilo de montaña de Michoacán. Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México. Tlanepantla, Estado de México. 80 p.
- López, C.H y F. Ortega E. 1989. Angiospermas arbóreas de México No. 2. Anatomía de la madera de once especies. Instituto de Ecología, A.C.-Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. Boletín Técnico La Madera y su Uso No. 23. Xalapa. 128 pp.
- López.-Mata, L., J.L. Villaseñor, G. Cruz-Cárdenas, E. Ortiz, y C. Ortiz-Solorio. 2012. Predictores ambientales de la riqueza de especies de plantas del bosque húmedo de montaña de México. *Botanical Sciences* 90(1):27-36.
- Luna, I., O. Alcántara, D. Espinosa y J.J. Morrone. 1999. Historical relationships of the Mexican cloud forests: a preliminary vicariance model applying parsimony analysis of endemism to vascular plant taxa. *Journal of Biogeography* 26(6):1299-1305.
- Metcalf, C.R. y L. Chalk. 1950. Anatomy of the dicotyledons. Vol. I. Clarendon Press. Oxford. 1459 p.
- Metcalf, C.R. y L. Chalk. 1983. Anatomy of the dicotyledons. 2a ed. Vol. II. Clarendon Press. Oxford. 315 p.
- Montaño-Arias, S., S.L. Camargo-Ricalde y C. de la Paz-Pérez-Olvera. 2013. Ecoanatomía de los elementos vasculares de la madera de cinco especies del género *Mimosa* (Leguminosae-Mimosoideae). *Botanical Sciences* 91(1):1-10.
- Nair, M.N.B. 1987. Occurrence of helical thickenings of the vessel element walls of dicotyledonous woods. *Annals of Botany* 60(1):23-32.
- Noshiro, S. y P. Baas 2000. Latitudinal trends in wood anatomy within species and genera: case study in *Cornus s. l.* (Cornaceae). *American Journal of Botany* 87(10):1495-1506.
- Ortega, F., L. Guerrero, T. Carmona y C. Córdoba. 1988. Angiospermas arbóreas de México Núm. 1. Anatomía de la madera de veintiocho especies de Cosautlán de Carvajal, Veracruz. La madera y su uso. Bol. Téc. No. 19. Instituto Nacional de Investigación Sobre Recursos Bióticos-Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. Xalapa, Veracruz. 179 p.
- Puig, H. 1993. Árboles y arbustos del bosque mesófilo de montaña de la reserva El Cielo, Tamaulipas, México. Instituto de Ecología A.C. Xalapa, Veracruz, México. 85 p.
- Pujana, R.R., L.C. A. Martínez y M. Brea. 2011. El registro de maderas fósiles de Leguminosae de Sudamérica. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales, n.s.* 13(2):183-194.
- Quintanar, A., C. De La Paz- Pérez O., I. De la Cruz y D. Razo. 1996. Anatomía de ocho especies de angiospermas de clima templado. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 58:5-14.
- Rohwer, J.G. 1993. Nectandra (Lauraceae). Flora Neotropica Monograph 60, New York Botanical Garden Press. Nueva York, NY. 332 p.
- Rzedowski, J. 1996. Análisis preliminar de la flora vascular de los bosques mesófilos de montaña de México. *Acta Botanica Mexicana* 35:25-44.
- Somaru-Ram, H.P. Borgaonkar y A.B. Sikder. 2008. Tree-ring analysis of teak (*Tectona grandis* L.F.) in central India and its relationship with rainfall and moisture index. *Journal of Earth System Science* 117(5):637-645.

- Terrazas, T., S. Aguilar-Rodríguez y L. López-Mata. 2008. Wood anatomy and its relation to plant size and latitude in *Buddleja* L. (Buddlejaceae). *Interciencia* 33(1): 46-50.
- Versteegh, C. 1968. Anatomical study of some woody plants of the mountain flora in the tropics (Indonesia). *Acta Botanica Neerlandica* 17:151-159.
- Villaseñor, J.L. 2010. El bosque húmedo de montaña en México y sus plantas vasculares: catálogo florístico-taxonómico. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad - Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 40 p.
- Wheeler A.E y P. Baas. 1993. The potentials and limitations of dicotyledonous wood anatomy for climatic reconstructions. *Paleobiology* 19(4):487-498.
- Woodcock, W.D., G. Dos Santos y C. Reynel. 2000. Wood characteristics of Amazon forest types. *IAWA Journal* 21(3):277-292.
- Manuscrito recibido el 15 de junio de 2013.
Aceptado el 22 de mayo de 2014.
- Este documento se debe citar como:
Aguilar-Alcántara, M., S. Aguilar-Rodríguez y T. Terrazas. 2014. Anatomía de la madera de doce especies de un el bosque mesófilo de montaña de Tamaulipas, México. *Madera y Bosques* 20(3):69-86.



Anatomía del culmo de bambú (*Guadua aculeata* Rupr.) de la región nororiental del estado de Puebla, México

Bamboo culms anatomy (*Guadua aculeata* Rupr.) of the north-east region of Puebla state, Mexico

Idalia Zaragoza-Hernández¹, Amparo Borja de la Rosa¹, Francisco José Zamudio Sánchez¹,
Víctor Rubén Ordóñez-Candelaria² y Guadalupe Martha Bárcenas-Pazos²

¹ División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo.: yayizar@yahoo.com.mx, aborja@correo.chapingo.mx, fjsams@yahoo.com

² Red de Ambiente y Sustentabilidad. Instituto de Ecología, A.C. victor.ordonez@inecol.mx, guadalupe.barcenas@inecol.mx

RESUMEN

Se realizó la caracterización anatómica de la pared de los culmos de *Guadua aculeata* Rupr., los especímenes fueron colectados en el predio “Las Margaritas” ubicado en el municipio de Hueytamalco, Puebla, México. El objetivo fue conocer la proporción de las estructuras anatómicas que componen el culmo y las dimensiones de las fibras, para contribuir al conocimiento de la especie. Se estudió la composición anatómica del culmo y se hizo la caracterización estructural de las fibras; en ambos casos se utilizaron cuatro culmos. Para la medición de las fibras, cada culmo se seccionó en tres partes de su longitud (inferior, medio y superior), de estas secciones se cortaron rodajas del entrenudo y cercanas al nudo. Se hicieron tres divisiones del interior al exterior de la pared del culmo en las rodajas (interna, media y externa). En la composición anatómica, la metodología fue similar a la caracterización de fibras hasta el corte de las rodajas del nudo y entrenudo. De estas se hicieron cortes histológicos transversales de 5 mm de espesor. La forma de los haces vasculares no coinciden completamente con la clasificación existente. El culmo está compuesto por 50% de parénquima, 41% de fibra y 9% de tejido conductivo. Las fibras miden en promedio 2,152 mm de longitud, 13,68 µm de diámetro, 3,29 µm de diámetro de lumen y 10,39 µm de grosor de pared.

PALABRAS CLAVE: caña brava, fibras de bambú, haces vasculares, parénquima, tarro, tejido conductivo.

ABSTRACT

The characterization of *Guadua aculeata* Rupr. ex Fournier culm wall was made; the specimens were collected on the locality “Las Margaritas”, which is located in the municipality of Hueytamalco, Puebla, Mexico. The objective was to determine the proportion of the anatomical structures that make up the culm and the fiber sizes, to contribute to the species knowledge. The anatomical composition of the culm and the characterization of the fibers were studied, using four culms. For the measurement of the fiber, each culm was cut into three parts lengthwise (lower, middle and higher). From these section slices from the internode and close to the node, were cut. Three sections were obtained from the inside wall of the culm in the slices (inner, middle and outer). For the anatomical composition, the methodology was the same than that for fibers characterization, except for the cut slices of node and internode. From those, transverse histological sections 5 mm thick were made. The form of the vascular bundles does not coincide completely with the existing classification. The culm composition is 50% of parenchyma, 41% of fiber and 9% of conductive tissue. The fibers average dimension were 2,152 mm length, 13,68 µm diameter, 3,29 µm lumen diameter and 10,39 µm in wall thickness.

KEY WORDS: caña brava, bamboo fibers, vascular bundles, parenchyma cells, tarro, conductive tissue.

INTRODUCCIÓN

El continente americano ocupa el segundo lugar en abundancia de especies de bambú, antecedido por Asia. De los países americanos, Brasil tiene la mayor cantidad de especies con alrededor de 140, seguido de Venezuela con 68 especies y Colombia 72, México se encuentra en el sexto lugar con 39. A lo largo del continente americano los géneros dominantes son: *Elytrostachys*, *Arthrostylidium* y *Guadua*. Las 26 especies de este último género se distribuyen desde el centro de México hasta el norte de Argentina, de 0 a 2200 metros sobre el nivel del mar (Bystriakova *et al.*, 2004; Londoño, 2006; Cedeño e Irigoyen, 2011).

Las cinco especies de *Guadua* existentes en México son las que alcanzan las mayores dimensiones de todos los bambúes que se desarrollan en este país. De las cinco especies, *Guadua aculeata* llega a medir 25 m de altura y 25 cm de diámetro en la base. Es una especie que desarrolla espinas en todas las ramas, tiene entrenudos huecos de 20 cm a 30 cm de largo y de 2 cm de espesor (Cedeño e Irigoyen, 2011; Cortés, 2000).

Esta especie conocida como “tarro” es utilizada en la construcción de viviendas, principalmente, también en la elaboración de muebles, como cerca viva o sombra, entre otros. Los culmos son obtenidos por lo general de bambusales naturales dado que los cultivados son escasos. Si bien, en la actualidad se mencionan plantaciones de tarro, estas solo se encuentran en algunos estados como Puebla y Veracruz, sin estar documentada la superficie precisa (Ordóñez, 1999; Cortés, 2000; Cedeño e Irigoyen, 2011).

Como todas las gramíneas, la especie de interés está conformada por el rizoma, tallo o culmo, ramas, hojas, flores y frutos (Qisheng *et al.*, 2003; Yang y Hui, 2010). El culmo es la parte del bambú más utilizada en la industria forestal (construcción, muebles, artesanías, entre otros), sin embargo la información tecnológica de la especie es poco documentada.

En general, el culmo está constituido por corteza (cutícula), haces vasculares y células de parénquima. Las proporciones y dimensiones de cada componente varían: entre especies, dentro de especies y dentro de un mismo individuo. Esto influye en la heterogeneidad de su densi-

dad básica, contracciones, contenido de humedad, entre otras propiedades físicas, mecánicas y químicas (Liese, 1998; Londoño *et al.*, 2002).

El conocimiento de las estructuras anatómicas de los culmos permitirá una mejor comprensión de su comportamiento en los procesos industriales a los cuales debe ser sometido para llegar a un producto final. Por lo tanto, conocer las características anatómicas se traduce en el adecuado manejo del material y a su vez en la optimización de los recursos.

OBJETIVOS

Conocer la proporción de las estructuras anatómicas que componen el culmo y las dimensiones de las fibras de *Guadua aculeata*, como una primera aportación al conocimiento de la especie.

MATERIALES Y MÉTODOS

La colecta del material se realizó en el predio “Las Margaritas” ubicado en el municipio de Hueytamalco, Puebla, México, a una altitud de 430 metros sobre el nivel del mar, entre las coordenadas geográficas 19° 52’ y 20° 12’ de latitud norte y 97° 12’ y 97° 23’ de longitud oeste. El predio se ubica sobre la carretera Hueytamalco-Ayotoxco de Guerrero, Puebla, aproximadamente a 12 km de la cabecera municipal de Hueytamalco, pasando la desviación a San José Acateno, Pue. (INEGI, 2009; INEGI, 2013).

La región presenta un clima cálido húmedo con abundantes lluvias en verano. Esta es una zona de transición con áreas reducidas de selva alta perennifolia; con vegetación secundaria arbustiva y bosque mesófilo de montaña. El material se recolectó en un bambusal natural (INEGI, 2009; INEGI, 2013).

Se utilizaron cuatro culmos de bambú de 9,5 m; 11,5 m; 13,0 m y 13,6 m de longitud, de 5 cm, 6 cm, 7 cm y 8 cm de diámetro, respectivamente; libres de daños físicos, ataque de plagas y enfermedades. Cada uno de los culmos se segmentó en tres partes iguales (inferior, media y superior). Se cortó una rodaja de cada sección del entrenudo y cercana al nudo (Fig. 2).

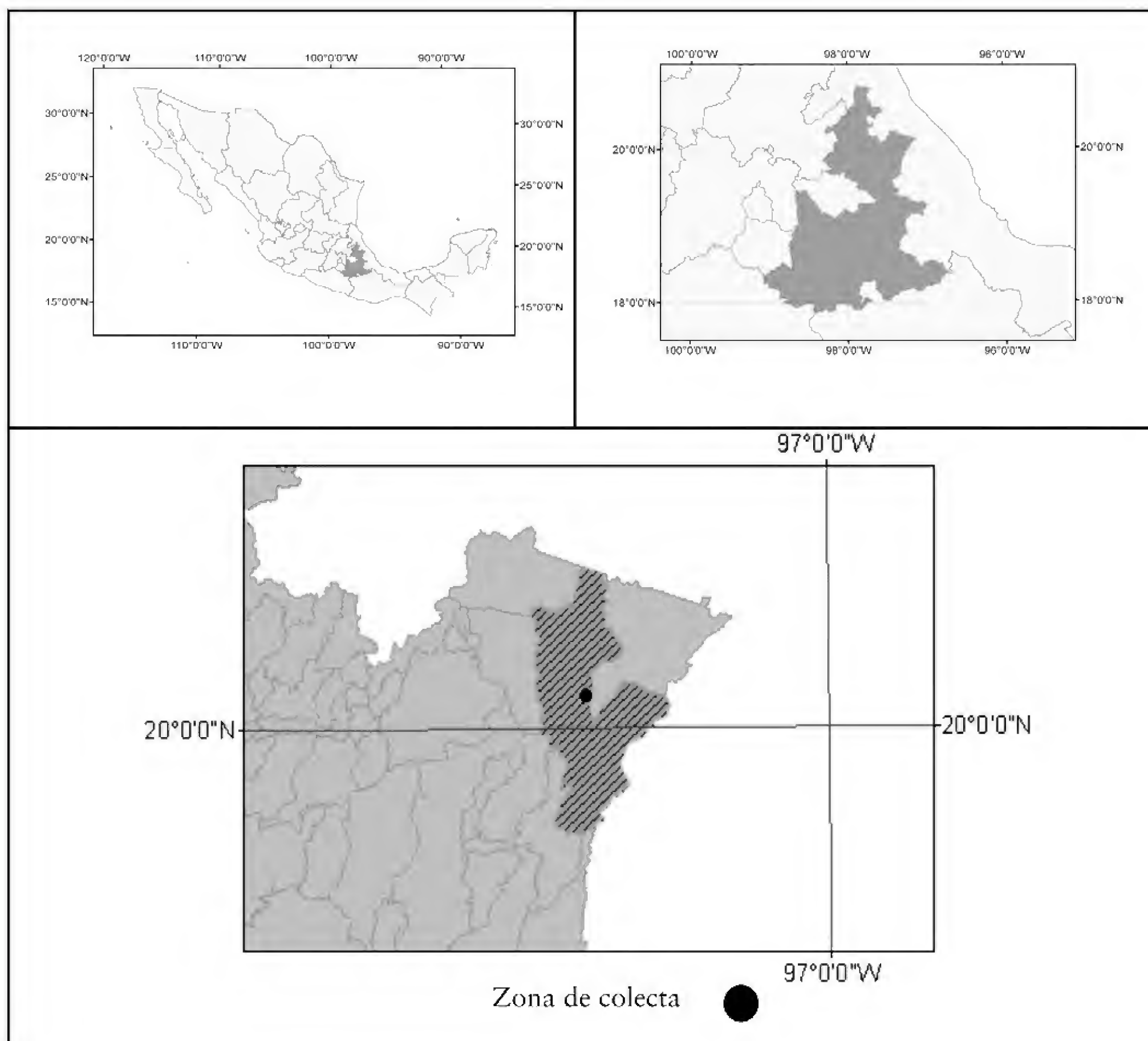


FIGURA 1. Ubicación de la zona de colecta.

La mitad de cada rodaja se colocó en un digestor diseñado y fabricado con las características determinadas por profesores-investigadores de la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Chapingo. Las muestras fueron sometidas a una presión de 2 kg/cm² durante dos minutos para ablandar las probetas. En seguida, de forma manual utilizando una sierra sable, se hicieron cortes transversales de 5 mm de espesor. En estas secciones se

midieron el área que ocupan las fibras, parénquima y tejido conductivo (vasos), en una franja de un milímetro de ancho, desde el interior al exterior del culmo. Las áreas se determinaron con fotografías de resolución de 3,15 megapíxeles utilizando el software Leica Application Suite versión 3.7.0.

Para determinar el tamaño de muestra de la proporción de los elementos anatómicos constituyentes del

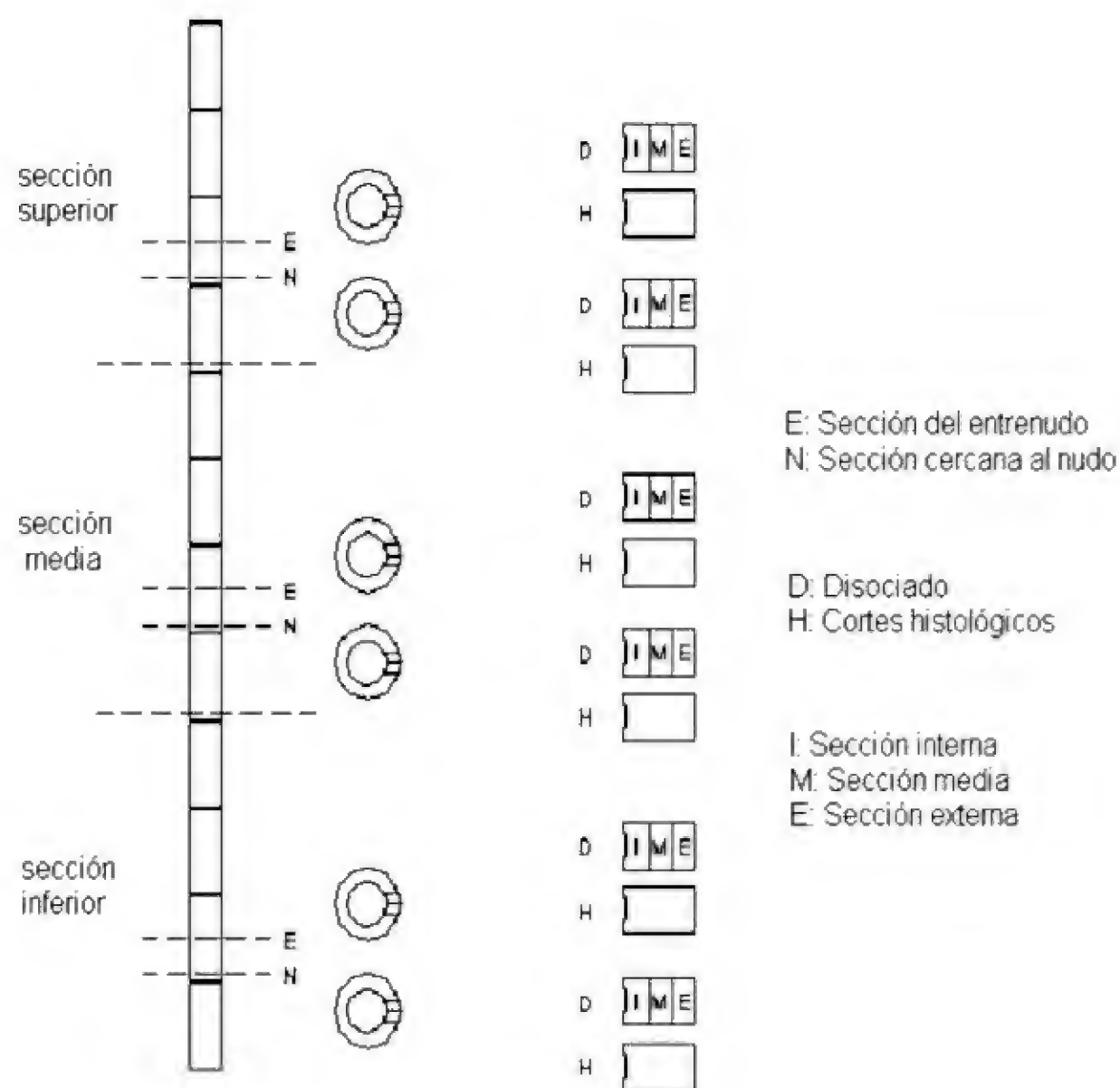


FIGURA 2. Diagrama de la obtención de probetas para la descripción anatómica.

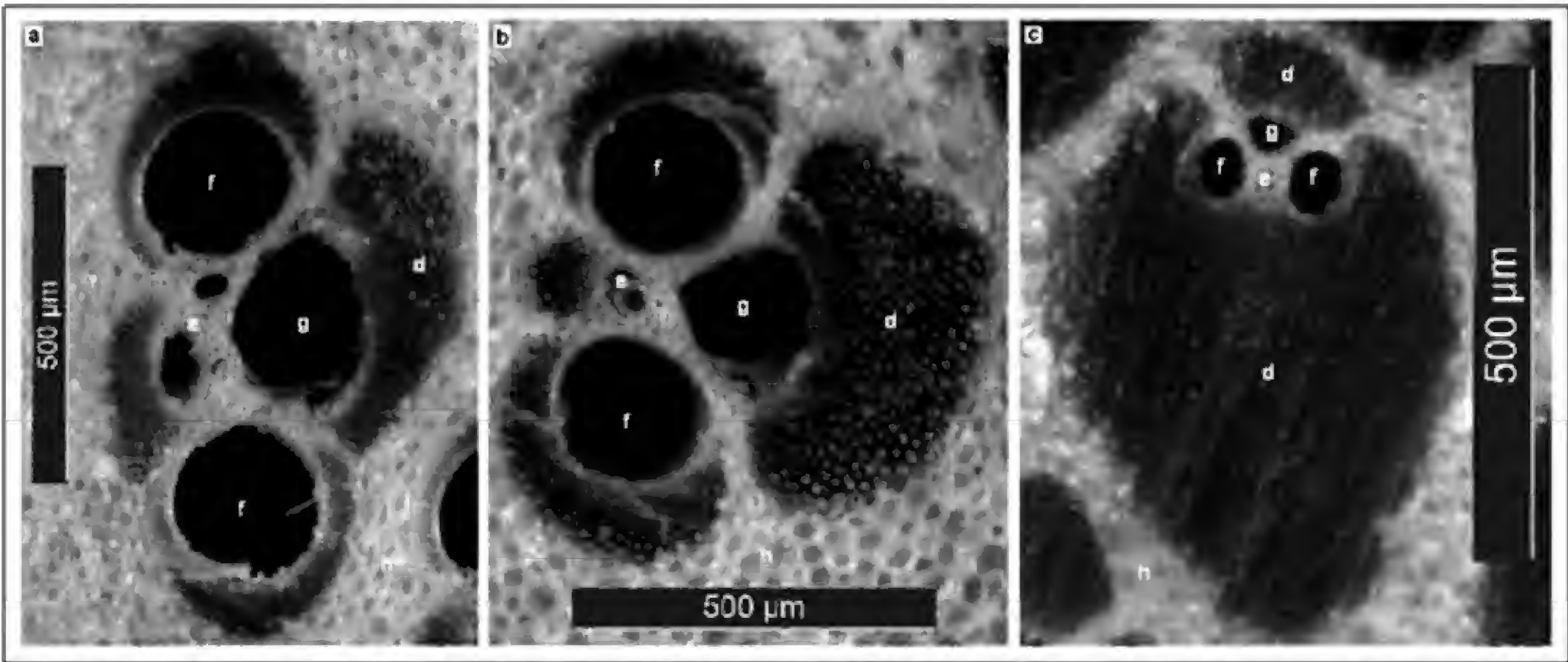


FIGURA 3. Haces vasculares de la sección interior (a), media (b) y exterior (c) del culmo; los tejidos que lo componen son las fibras (d), protoxilema (e), el metaxilema (f), el floema (g) y el parénquima (h).

culmo, se consideró un nivel de confianza de 10%, obteniendo un resultado de 12 franjas a medir. Se utilizó la siguiente fórmula (Gilbert, 1987):

$$n = \frac{(t^2 \times c^2)}{d^2}$$

- Donde:
- n*: Tamaño de muestra.
 - t*: Valor de *t* para la confiabilidad deseada.
 - c*: Coeficiente de variación.
 - d*: nivel de confianza

De la otra mitad de la rodaja se obtuvieron astillas para la preparación de material macerado. Las astillas se colocaron en frascos con solución de ácido acético y peróxido de hidrógeno 50/50. Este material se colocó en una estufa a una temperatura de 60 °C durante 60 horas con el fin de eliminar la lámina media de los elementos anatómicos.

El macerado se lavó con agua destilada, se tiñó con pardo de Bismark y se elaboraron preparaciones temporales. Se midieron la longitud y los diámetros de las fibras, y los lúmenes con una cámara Leicaicc50 con una resolución de 3 megapíxeles y el *software Leica Application Suite* versión 1.8. El número de fibras por medirse calculó aplicando la misma fórmula utilizada en los elementos anatómicos constituyentes del culmo y un nivel de confianza de 5%, obteniendo un tamaño de muestra de 55 fibras para cada una de la secciones del culmo.

Los índices de calidad de pulpa de papel se calcularon utilizando los valores medios de longitud, grosor de paredes de la fibra, diámetro de lúmenes y diámetro de las fibras.

Coeficiente o índice de rigidez: $C.R. = 2w/D$

- Coeficiente de flexibilidad: $C.F. = l / D$
- Coeficiente de Peteri o índice de esbeltez: $I.E. = L / D$
- Relación de Runkel: $R.R. = 2w / l$
- Donde:
- D*: diámetro de la fibra
 - L*: longitud de la fibra
 - l*: diámetro del lumen
 - 2w*: grosor de la pared de la fibra

RESULTADOS

Los haces vasculares observados en *G. aculeata* están formados por dos vasos de metaxilema, uno o más vasos de floema, uno o más vasos de protoxilema y un conjunto de fibras que rodean a los elementos conductivos. Los haces cercanos al interior del culmo (Fig. 3a) presentan un grupo de fibras rodeando en mayor proporción a los vasos de metaxilema y principalmente al floema, y un grupo menor rodea al protoxilema, esta distribución de los elementos anatómicos se modifica del interior al exterior del culmo.

En la sección media de la pared del culmo, el conjunto de fibras que rodea al protoxilema aumenta, en algunos casos, hasta igualarse al grupo de fibras que rodea al floema (Fig. 3b). Conforme se acerca al exterior del culmo, la mayor proporción de fibras rodea al protoxilema, sin dejar de cubrir los alrededores del floema (Fig. 3c).

La proporción de los elementos constituyentes de la pared del culmo en dirección axial (inferior, media y superior) de secciones del entrenudo y cercanas al nudo se presentan en la tabla 1. En la tabla 2 se presentan las medidas de fibras de la sección interna, media y externa, del nudo y entrenudo, de la zona inferior, media y superior del culmo.

TABLA 1. Composición de la pared del culmo en dirección axial.

<i>Estructura (%)</i>	<i>Entrenudo inferior</i>	<i>Nudo inferior</i>	<i>Entrenudo medio</i>	<i>Nudo medio</i>	<i>Entrenudo superior</i>	<i>Nudo superior</i>	<i>Promedio</i>
Fibra (%)	39 A	36 B	43 A	44 A	43 A	42 A	41
Parénquima	54 A	57 A	47 B	47 B	45 B	49 B	50
Poros	7 D	6 D	10 B	10 B	12 A	9 C	9

Los promedios con letras iguales presentan diferencia no significativa entre ellas con un nivel de significancia de 5%. El término nudo del título de las columnas se refiere a las secciones cercanas al nudo.

TABLA 2. Dimensiones de fibras en dirección axial y transversal.

Variable	Sección longitud	Sección entrenudo			Sección cercana al nudo			Promedio
		Interno	Medio	Externo	Interno	Medio	Externo	
Longitud de fibra (mm)	Inferior	2,15	2,66	2,56	2,22	2,44	2,52	2,42
		B	A	A	B	A	A	
	Media	1,84	2,25	2,13	1,93	2,15	2,13	2,07
		C	B	B	C	B	B	
	Superior	1,84	2,22	2,12	1,66	1,99	1,96	1,96
		C	B	B	C	B	B	
	Promedio	1,94	2,38	2,27	1,93	2,19	2,20	2,15
Diámetro de fibra (µm)	Inferior	13,58	16,72	15,12	13,29	15,68	14,11	14,75
		B	A	A	B	A	B	
	Media	12,33	14,14	14,06	12,69	14,37	14,47	13,68
		C	B	B	B	B	B	
	Superior	12,22	13,42	12,62	12,15	13,02	12,21	12,61
		C	B	B	C	B	C	
	Promedio	12,71	14,76	13,93	12,71	14,36	13,60	13,68
Diámetro de lumen (µm)	Inferior	3,29	3,92	3,36	3,25	3,64	3,52	3,50
		A	A	A	A	A	A	
	Media	3,03	3,29	3,79	3,10	3,65	3,36	3,37
		B	A	A	A	A	A	
	Superior	3,07	3,26	3,04	2,69	3,01	2,99	3,01
		B	A	B	B	B	B	
	Promedio	3,13	3,49	3,40	3,01	3,44	3,29	3,29
Grosor de pared (µm)	Inferior	5,15	6,40	5,88	5,02	6,02	5,29	5,63
		B	A	A	B	A	B	
	Media	4,65	5,43	5,13	4,80	5,36	5,55	5,15
		C	B	B	B	B	B	
	Superior	4,58	5,08	4,79	4,73	5,00	4,61	4,80
		C	B	B	B	B	C	
	Promedio	4,79	5,64	5,27	4,85	5,46	5,15	5,19

Los promedios con letras iguales presentan diferencia no significativa entre ellas con un nivel de significancia de 5%.



Con las dimensiones obtenidas en este trabajo se calcularon el coeficiente de rigidez igual a 0,76; el coeficiente de flexibilidad igual a 0,24; el índice de esbeltez igual 162,69 y la relación de Runkel igual a 3,29.

DISCUSIÓN

La forma de los haces vasculares es semejante, en la periferia, a los de *Guadua trinii* y *Guadua chacoensis*. En la sección interna de *G. aculeata* se encontraron haces similares en forma a los de *G. chacoensis*, *G. trinii* y *Guadua paraguayensis* (Rúgolo de Agrasar y Rodríguez, 2003). Se confirmó, además, la variación de la forma, tamaño y distribución en las direcciones trasversal y longitudinal de los haces, señalado por Liese (1998).

Las características de forma y distribución de los componentes de los haces vasculares no coincidió completamente con ninguno de los tipos de haces descritos por Liese (1998). Sin embargo, presentó características del tipo II y IIa, como la mayor cantidad de fibras que rodea al floema comparada con los costados del haz y, conforme se acerca a la periferia, el conjunto de fibras se hace mayor hacia al lado del protoxilema (Liese, 1998).

La proporción menor de fibras se ubicó en la zona cercana al nudo inferior, siendo la única que presentó diferencias significativas con el resto de las zonas. El promedio de la proporción de fibras obtenido para el material en estudio, fue semejante a los valores de *Guadua angustifolia* que contiene 40%, valor señalado como generalidad en los bambúes (Liese, 1998; Londoño *et al.*, 2002). En la zona interna del culmo, los haces vasculares resultaron mayores que los de la zona externa, asimismo se identificó que los espacios vacíos (protoxilema, metaxilema y floema) tenían mayor dimensión, que los haces se encuentran más separados entre sí, y que la proporción de parénquima incrementa en comparación con el último tercio hacia el exterior de culmo.

El parénquima del material estudiado, presentó la mayor proporción de las estructuras anatómica de los culmos; el promedio obtenido para esta especie fue cercano a 52%, valor promedio para los bambúes en general, y similar a los de *G. angustifolia* obtenidos por Liese (1998) y

Londoño *et al.* (2002) que obtuvieron 51%. En la parte inferior de los culmos se identificaron las mayores cantidades de parénquima, siendo estadísticamente diferente a los resultados obtenidos para las secciones media y superior.

El tejido conductivo presentó el menor porcentaje de elementos en la composición del culmo, siendo semejante al obtenido para *G. angustifolia* de 9% según Londoño (2002) y similar al promedio generalizado de 8% para los bambúes, señalado por Liese (1998). En este estudio se encontró que el entrenudo superior contiene las proporciones mayores de este tejido, resultando significativamente diferente de los valores registrados para las zonas inferior, media y cercana al nudo superior del culmo.

Las longitudes de la fibras obtenidas para *G. aculeata* variaron entre 1,66 mm y 2,66 mm, valores mayores a los encontrados por Omobowale y Ogedengbe (2008) en *Bambusa vulgaris* (1,40 mm - 1,80 mm) y en *Gingantchloa levis* (1,82 mm) estudiada por Espiloy (1985). Sin embargo, son menores a los de *Bambusa blumeana* (2,56 mm), *B. vulgaris* (2,37 μ m - 3,70 μ m) y *G. levis* (3,76 mm - 4,48 mm) (Espiloy, 1985; Ogunsile y Uwajeh, 2009; Wahab *et al.*, 2009; Guimarães *et al.*, 2010; Nordahlia *et al.*, 2012).

Del interior al exterior del culmo, las fibras que presentaron mayor longitud del entrenudo y cercanas al nudo se ubican en el centro y periferia de la pared del culmo, las de menor largo en el interior (Tabla 2). De acuerdo con las observaciones realizadas en cortes histológicos y las mediciones en otras especies, esto puede deberse al proceso de envejecimiento de la pared del culmo, que se observa más marcado en la zona interna del culmo. Esta condición se traduce en una menor densidad en la parte interna del culmo en comparación con la periferia, lo cual se debe tomar en cuenta para el uso del material (Liese y Weiner, 1996).

La longitud promedio de las fibras obtenida disminuyó de la base hacia el ápice del culmo; tendencia similar a lo publicado por Omobowale y Ogedengbe (2008) para *Bambusa vulgaris*, Wahab *et al.* (2009) para *B. vulgaris*, y Nordahlia *et al.* (2012) para *Gingantchloa levis*, esto puede deberse a que en la parte superior del culmo se

encuentran las células más jóvenes, es decir, no han alcanzado la madurez, condición diferente a las estructuras de la parte inferior.

El diámetro de la fibra aquí encontrado varió de 12,15 μm a 16,72 μm (Tabla 2), estos valores tienen similitud con *B. blumeana* (14,2 μm - 15,2 μm) y *G. levis* (15,5 μm - 16,5 μm). El promedio de esta variable en el culmo de *G. aculeata* resultó menor al publicado para *G. levis* (16,0 μm - 25,7 μm), *B. vulgaris* (13,93 μm - 27,3 μm) (Espiloy, 1985; Ogunsile y Uwajeh, 2009; Wahab *et al.*, 2009; Guimarães *et al.*, 2010; Nordahlia *et al.*, 2012).

Las dimensiones de los diámetros de la fibra de las secciones media y externa de la pared del culmo del entrenudo fueron mayores que las de la interna, siendo estadísticamente diferentes. En las secciones cercanas al nudo, las zonas inferior y superior presentaron la mayor longitud en parte media de la pared, existiendo diferencias significativas con las secciones internas y externas; para la zona media del largo del culmo no se registraron estas diferencias. El diámetro promedio de la fibra disminuyó de la base hacia el ápice, esta tendencia coincide con los resultados de Espiloy (1985) para *B. blumeana* y los de Wahab *et al.* (2009) para *B. vulgaris*. Al igual que para la longitud de fibra, esta situación se puede deber a que las estructuras más jóvenes se ubican en la parte superior del culmo.

El promedio general del diámetro del lumen que se obtuvo fue de 3,29 μm , el valor mínimo fue de 2,69 μm y el máximo de 3,92 μm , los valores se aproximan a lo publicado para *B. blumeana* (3,2 μm - 4,6 μm) y *B. vulgaris* (2,4 μm - 2,6 μm). La media del culmo es menor a lo registrado para *G. levis* (5 μm - 16 μm) y *B. vulgaris* (8 μm - 10,4 μm) (Espiloy, 1985; Sekyere, 1994; Ogunsile y Uwajeh, 2009; Wahab *et al.*, 2009; Guimarães *et al.*, 2010; Nordahlia *et al.*, 2012). El diámetro de lumen disminuyó de la base a la parte superior del culmo, con diferencias significativas entre la parte superior cercana al nudo, las secciones superiores externa e interna del entrenudo y la sección interna a la altura media del culmo con el resto de las secciones.

El grosor de pared de la fibra que se midió fue de 4,58 μm a 6,40 μm , similar al que se ha publicado para *B. blumeana* (5,2 μm - 6,1 μm) y *B. vulgaris* (3,29 μm - 7,10 μm) y menor al de *G. levis* (10 μm - 12 μm). En el entrenudo, se obtuvieron diferencias significativas entre las secciones exterior y media de la pared del culmo con la interna; en las secciones cercanas al nudo, estas diferencias se presentaron entre la sección interna con ambos lados en la parte inferior y entre la exterior con las media e interna de la parte superior (Espiloy, 1985; Sekyere, 1994; Ogunsile y Uwajeh, 2009; Wahab *et al.*, 2009; Guimarães *et al.*, 2010; Nordahlia *et al.*, 2012).

El grosor de la pared influye directamente en la densidad básica, propiedad que se ve reflejada en otras propiedades físicas y mecánicas. Por otro lado, las fibras de bambú tienen estructura polilaminar; en la madurez se presentan la mayor cantidad de láminas, característica observada en *G. aculeata*. Las fibras son las estructuras de soporte, entre mayor grosor presentan aumenta la resistencia mecánica; las paredes gruesas de *G. aculeata* junto con la estructura polilaminar hacen de sus culmos adecuados para su uso en la construcción (Liese, 1998).

De acuerdo con las clasificaciones que existen los valores obtenidos para los coeficientes de rigidez y de flexibilidad, el índice de esbeltez y la relación de Runkel indican que las fibras de *G. aculeata* son largas pero con paredes gruesas, por lo tanto, es un material de mala calidad para la elaboración de papel (Porres y Valladares, 1979; Tortorelli, 1956).

CONCLUSIONES

Este trabajo significa una de las primeras aportaciones para el estudio de la anatomía de las paredes de los tallos de bambúes nativos de México.

Las estructuras anatómicas identificadas y medidas, así como las proporciones y distribución dentro de las paredes de los tallos se catalogan dentro de los valores promedio que se han publicado para otras especies de bambú.

Por el tamaño y proporción de sus fibras, además del grosor de sus paredes puede considerarse como una especie adecuada para ser utilizada en la construcción.



La relación entre la longitud y el grosor de la pared de las fibras indican que no es idónea para la elaboración de papel.

REFERENCIAS

- Bystriakova, N., V. Kapos e I. Lysenko. 2004. Africa, Madagascar and the Americas. International Network for Bamboo and Rattan. Beijing. 90 p.
- Cedeño V., A. y J. Irigoyen C. 2011. El bambú en México. *USJT Arq. Urb.* 6:223-243.
- Cortés R., G.R. 2000. Los bambúes nativos de México. *Conabio. Biodiversitas* 30:12-15.
- Espiloy, Z.B. 1985. Physico-mechanical properties and anatomical relationships of some Philippine bamboos. International Bamboo Workshop. China. p:257-264.
- Gilbert, R.O. 1987. Statistical methods for environmental pollution monitoring. Van Nostrand Reinhold. 320 p.
- Guimarães Junior, M., K. Monteiro-Novack y V.R. Botaro. 2010. Caracterização anatômica da fibra de bambu (*Bambusa vulgaris*) visando sua utilização em compósitos poliméricos. *Revista Iberoamericana de Polímeros* 11(7):442-456.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Disponibles en: de: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/21>. Consultada el 10/12/2013.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2013. Principales tipos de vegetación de México. Disponible en: <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datos-geogra/vegfauna/vegeta.cfm>. Consultada el 10/12/2013.
- Liese, W. 1998. The anatomy of bamboo culms. INBAR Technical Report N° 18. International Network for Bamboo and Rattan. Beijing. 204 p.
- Liese, W. y G. Weiner. 1996. Ageing of bamboo culms. A review. *Wood Science and Technology* 30:77-89
- Londoño, X. 2006. Aspectos generales de los bambúes americanos. *Revista electrónica Bio bambú*. Disponible en: <http://www.bambumex.org/paginas/ASPECTOS%20GENERALES.pdf>. Consultada el 10/09/2011.
- Londoño, X., G.C. Camayo, N.M. Riaño y Y. López. 2002. Characterization of the anatomy of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) culms. *Bamboo Science and Culture: The Journal of the American Bamboo Society* 16(1):18-31.
- Nordahlia, A.S., U.M.K. Anwar, H. Hamdan, A. Zaidon, M.T. Paridah y O. Abd Razak. 2012. Effects of age and height on selected properties of malasyan bamboo (*Gigantochloa levis*). *Journal of Tropical Forest Science* 24(1):102-109.
- Ogunsile, B.O. y C.F. Uwajeh. 2009. Evaluation of the pulp and paper potentials of a Nigerian grown *Bambusa vulgaris*. *World Applied Sciences Journal* 6(4):536-531.
- Omobowale, M.O. y K. Ogedengbe. 2008. Trends and fiber characteristics of Nigerian grown bamboo and its effect in its impact and tensile strengths. *Bamboo Science and Culture: The Journal of the American Bamboo Society* 21(1):9-13.
- Ordóñez C., V.R. 1999. Perspectivas del bambú para la construcción en México. *Madera y Bosques* 5(1):3-12.
- Porres, C. y J. Valladares. 1979. Producción de pulpa y papel con materias primas autóctonas centroamericanas. Instituto Centroamericano de Investigaciones y Tecnología Industrial. Guatemala. 72 p.
- Qisheng, Z., J. Shenxue y T. Yongyu. 2003. Industrial utilization on bamboo. INBAR Technical Report N° 26. International Network for Bamboo and Rattan. Beijing. 207 p.
- Rúgolo de Agrasar, Z.E. y M.F. Rodríguez. 2003. Culm anatomy of native woody bamboos in Argentina and neighboring areas: Cross section. *Bamboo Science and Culture: The Journal of the American Bamboo Society* 17(1):28-43.
- Sekyere, D. 1994. Potencial of bamboo (*Bambusa vulgaris*) as a source of raw material for pulp and paper in Ghana. *Ghana Journal of Forestry* 1:49-56
- Tortorelli L., A. 1956. Maderas y bosques argentinos. ACME. Buenos Aires. 910 p.
- Wahab, R., A. Mohamed, M.T. Mustafa y A. Hassan. 2009. Physical characteristics and anatomical properties of cul-

tivated bamboo (*Bambusa vulgaris* Schrad) culms. *Journal of Biological Sciences* 9(7):753-759.

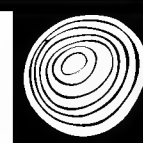
Yang, Y. y C. Hui. 2010. China's bamboo. INBAR Technical Report N° 33. International Network for Bamboo and Rattan. Beijing. 227 p.

Manuscrito recibido el 29 de junio de 2012.

Aceptado el 2 de mayo de 2014.

Este documento debe citarse como:

Zaragoza-Hernández, I., A. Borja de la Rosa, F.J. Zamudio-Sánchez, V.R. Ordóñez-Candelaria y G.M. Bárcenas-Pazos. 2014. Anatomía del culmo de bambú (*Guadua aculeata* Rupr.) de la región nororiental del estado de Puebla. *Madera y Bosques* 20(3):87-96.



Desarrollo de *pellets*

a partir de tres especies leñosas bajo condiciones mediterráneas

Pellets development from three woody species under Mediterranean conditions

Harald Fernández-Puratich^{1*}, José Vicente Oliver-Villanueva², Mireya Valiente³, Salvador Verdú y Nuria Albert³

¹ Universidad de Talca. Facultad de Ingeniería. Centro de Sistemas de Ingeniería. Curicó, Chile.

² Universitat Politècnica de València. Grupo de Investigación en Ciencias y Tecnología Forestal. Valencia, España

³ Universitat Politècnica de València. Escuela Técnica de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Valencia, España

* Autor de correspondencia, e.e.: hfernandezp@utalca.cl

RESUMEN

La biomasa leñosa como recurso energético varía según tres factores: 1) especie, 2) condiciones ambientales que influyen en su producción y 3) dispersión en el territorio. La estimación de la aptitud de este recurso es crucial para el desarrollo sustentable del sector agroforestal y, en concreto, de la cadena de valor bosque-industria-consumo. Tomando en cuenta esta situación, el objetivo de este documento consistió en determinar la aptitud de tres tipos arbóreos como biocombustible sólido. Una especie forestal (*Quercus ilex*), un cultivo energético (*Paulownia spp.*) y tres especies frutales *Citrus sinensis* (naranja), *Olea europaea* (olivo) y *Prunus amygdalus* (almendro). Para alcanzar este objetivo, la investigación se centró en la caracterización física, química y energética de la biomasa leñosa de estas especies. Con base en un muestreo representativo, los resultados obtenidos sirvieron para determinar de forma cualitativa las aptitudes y limitaciones de estas especies como biocombustible sólido. Los principales resultados demuestran que la biomasa de cada especie estudiada es apta para su uso energético como biocombustible sólido, con la excepción de la madera de naranja que presenta algunas limitaciones para la fabricación de *pellets*.

PALABRAS CLAVE: biocombustible sólido, *Citrus sinensis*, *Olea europea*, *Paulownia spp.*, *Prunus amygdalus*, *Quercus ilex*.

ABSTRACT

Woody biomass as an energy source varies according to species, environmental conditions that influence their production and dispersal in the territory. The estimation of the suitability of this resource is crucial for sustainable development of agro-forestry and, specifically, of the value chain forest-industry-consumer. Considering this situation, the aim of this paper was to determine the suitability of three types of trees as solid biofuel. A forest species (*Quercus ilex L. subsp. ballota (Desf.) Samp.*); an energy crop (*Paulownia spp.*) and three fruit species *Citrus sinensis* (orange), *Olea europaea* (olive) and *Prunus amygdalus* (almond). In order to achieve this goal, the paper is focused on the physical, chemical and energetic characteristics of woody biomass of these species. Based on representative sampling, the results obtained qualitatively determined the capabilities and limitations of these species as solid biofuel. The main results of the analysis show that the biomass of all species are suitable for energy use as solid biofuel, with the exception of the orange tree wood that has some limitations for the production of pellets.

KEYWORDS: Solid biofuel, *Citrus sinensis*, *Olea europea*, *Paulownia spp.*, *Prunus amygdalus*, *Quercus ilex*.

INTRODUCCIÓN

El presente escenario de costos derivados de la demanda del petróleo, junto con los problemas por la producción de CO₂ provenientes de los combustibles fósiles, han llevado a las autoridades a compromisos de potenciación de las

energías renovables y de fomento a la biomasa forestal con fines energéticos (Tolosana, 2009).

Visto desde una perspectiva global, según el Programa Chile Sustentable (2002), el actual sistema de abas-

tecimiento de energía repercute en el aumento de los precios de esta a nivel mundial y en el uso casi exclusivo de fuentes energéticas no renovables, siendo un modelo de solución un método de abastecimiento propio de gran autonomía, lo que se puede lograr con el uso complementario de recursos renovables.

En Chile, el recurso renovable de mayor consumo es la leña, que representa alrededor de 18% de la matriz energética del país. En promedio, en el sector residencial el consumo de leña es de 65% (Ministerio de Energía, 2011; FAO, 2012), porcentaje que va aumentando hacia el sur del país, reflejando la magnitud del uso de este biocombustible a nivel nacional. Sin embargo, la combustión residencial de leña en artefactos de baja eficiencia implica grandes consecuencias, entre ellas, el deterioro de la calidad del aire de varias ciudades del centro-sur y sur del país, principalmente en los meses de invierno. Sin embargo, es el combustible más económico con que cuenta la población para su calefacción.

Por esto último, el gobierno de Chile considera prioritario el desarrollo de una estrategia tendiente a la reducción de las emisiones ocasionadas por la combustión de leña, contemplándose incentivar el uso de tecnologías de combustión residencial alternativas a la leña. Dentro de estas tecnologías se encuentran los *pellets*, que son biocombustibles sólidos, homogéneos, de bajo contenido de humedad y con una alta densidad energética, tienen forma cilíndrica con diámetros normalmente comprendidos entre 7 mm y 22 mm y longitudes de 3,5 cm a 6,5 cm, cuya fabricación se realiza a alta presión, sin necesidad de utilizar algún tipo de adhesivo (Marcos y Núñez, 2006). Estos, generan bajas emisiones cuando se emplean en artefactos de alta eficiencia, reduciendo las emanaciones de CO₂ en 50% comparado con la combustión de leña o astillas, posee bajas concentraciones de azufre (entre 0,004% y 0,007% del peso seco final de cada *pellet*) y de nitrógeno (entre 0,05% y 0,16% del peso seco final de cada *pellet*) (Rojas, 2004). Son empleados principalmente en países con alta demanda de calefacción. En Chile, se están comenzando a consumir en calderas, pero aún existe una baja penetración en el mercado.

Al fabricar y comercializar este tipo de combustibles, se disminuye considerablemente la cantidad de residuos, se reduce el volumen transportado, así como también se logra una combustión más limpia y eficiente.

Si bien, el estudio es llevado a cabo en la región mediterránea de España los resultados obtenidos son completamente homologables a la región mediterránea chilena, debido a las similitudes climáticas (Boydak y Dogru, 1997). La región mediterránea de España abarca gran parte de la costa del mismo nombre y algunas zonas del interior de España. Las lluvias son irregulares, entre 400 mm y 700 mm anuales, y se concentran especialmente en otoño y primavera. Los inviernos son cortos y suaves mientras que los veranos son largos y calurosos. La temperatura media anual ronda entre 15 °C y 18 °C (AEMET, 2014). El sector mediterráneo chileno, abarca la región geográfica Centro-Norte del país, entre los 32° y 38° de latitud Sur aproximadamente, siendo en general el promedio de precipitación de 500 mm a 700 mm al año y una temperatura promedio de 13 °C a 14 °C al año, lo que varía en la zona costera con respecto al interior (Arroyo *et al.*, 1995, Santibáñez y Uribe, 1992). También existe similitud en la flora de estas regiones (Verdú *et al.*, 2002; Domínguez-Lozano y Schwartz, 2005) que se presenta en la zona central del país. Además, cuentan con similares especies forestales y las mismas especies frutales tratadas en este estudio. El caso de *Paulownia spp.* (paulonia) es distinto ya que, si bien en España existen actualmente plantaciones productivas tanto para biocombustible como para su uso en la industria del tablero, en Chile no existen estudios acabados al respecto, por lo que se examinará con el objetivo de un futuro establecimiento masivo para fines energéticos.

De esta manera, este estudio apunta a determinar el potencial energético de las especies seleccionadas teniendo por fin el suministro sostenido de biomasa agroforestal bajo condiciones mediterráneas lo que se logrará a través de la caracterización de sus maderas desde el punto de vista físico, químico y energético determinando su aptitud para estos fines a través de normas de calidad existentes.

Cabe mencionar que las especies analizadas en este estudio cumplirían la función de complemento como



materia prima con respecto a *Pinus radiata* que es la especie forestal de principal explotación en Chile, siendo su participación de 95% en la industria del aserrío (GTZ/ INFOR, 2007), y por ende, es la especie de mayor generación de residuos leñosos.

OBJETIVOS

El objetivo general fue investigar el potencial energético de nuevas fuentes biomásicas de especies leñosas para el suministro sostenido de energía bajo condiciones mediterráneas, similares a las de la zona Central de Chile.

Para alcanzar el objetivo general, se incluyen los siguientes objetivos específicos:

- Seleccionar especies y diseñar el muestreo.
- Determinar las propiedades físicas de la biomasa leñosa obteniendo principalmente la información sobre la densidad (básica) y contenido de humedad.
- Caracterizar químicamente la biomasa leñosa por medio de un análisis elemental y análisis secundario en todas las especies estudiadas.
- Determinar las propiedades energéticas de la madera por especie, determinando el poder calorífico y porcentaje de cenizas.
- Comparar los resultados obtenidos para todas las especies con las normas existentes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio abarca el litoral e interior de la Comunidad Valenciana (España) localizada entre los 40° 47' y 37° 51' de latitud Norte. Fue elegida como se señaló anteriormente por su similitud climatológica y de flora con la zona central de Chile, ambas de clima mediterráneo.

Selección de especies

Se clasificaron las especies estudiadas en tres tipos arbóreos:

Especie forestal: la encina (*Quercus ilex* spp. ballota) que es la latifoliada más representativas de España. Según PGOF (2004) más de 70% de sus bosques puros se encuen-

tran de 1000 m a 1200 m snm. Una parte importante es regeneración natural resultante de devastadores incendios hace aproximadamente 30 años.

Cultivo energético leñoso: la paulonia (*Paulownia* spp.), escogida por su rápido crecimiento, sus favorables características energéticas para la producción de *pellets* (Falasca y Bernabe, 2010), además de la existencia de viveros, parcelas conocidas de ensayo y producción dentro de España. Si bien es cierto que Paulonia es una especie ya probada en algunos países, en Chile no existen plantaciones productivas y los artículos científicos publicados sobre esta especie y en esta materia son escasos hasta el momento.

Especies agrícolas leñosas: que presentan la mayor superficie ocupada de la región (Censo Agrario, 1999) y tienen características arbóreas definidas (fuste y copa): *Citrus sinensis* (naranja), *Olea europaea* (olivo) y *Prunus amygdalus* (almendro), siendo estas especies también cultivadas en Chile.

Diseño muestral de áreas y toma de muestras

El muestreo de las especies se realizó en distintas comarcas de la región y a distintas altitudes. La encina fue muestreada a 1000 m snm, la paulonia a 20 m y 700 m snm, el naranja a 70 m y 110 m snm, el olivo y el almendro a 620 m snm, siendo la recolección de muestras para encina en zonas boscosas, para paulonia en plantaciones comerciales y para los árboles frutales en terrenos de carácter agrícola.

Selección de parcelas

Se seleccionaron 20 parcelas representativas por especie, de un tamaño mínimo de 0,25 hectáreas. Los criterios de selectividad, para efectos prácticos de medición y homogenización de los datos obtenidos, han sido: una misma zona geográfica; representatividad, disponibilidad y accesibilidad; coetaneidad, requerimientos hídricos, edafológicos, climatología y de altitud similares (Fernández-Puratic, 2013). Luego de estas 20 parcelas se seleccionaron cuatro a seis de forma aleatoria para ser evaluadas.

Selección de individuos

Dentro de cada parcela, utilizando el método de Hapla y Saborowski (1984), que establece como cifra aceptable 15 árboles por parcela, se recolectó el material teniendo una muestra total mínima de 75 árboles por especie, coetáneos, de un mismo origen y en iguales condiciones de sitio. Ese número es una cantidad representativa, de acuerdo con lo indicado por este método, para las estimaciones y análisis de este estudio. Una vez seleccionados los 15 árboles por muestreo aleatorio simple se tomaron muestras de fuste y ramas según correspondía.

Recolección de muestras

Se obtuvieron muestras de fuste del cultivo energético y de la especie forestal cortando cinco árboles representativos de cada parcela, y de cada uno se obtuvieron seis discos hasta los 5,5 m de altura. Luego, las muestras se llevaron a laboratorio para su caracterización (análisis físicos, químicos y energéticos) según las normas técnicas establecidas.

De las especies frutales se tomaron muestras en las ramas, las ramas de primer orden se consideraron parte del fuste, ya que poseen características visuales similares, por lo que se catalogaron como no representativas y no corresponden al tipo de ramas de podas (ramas de segundo y/o tercer orden). La toma de muestras se subdividió en dos clases:

- Diámetro < 7,0 cm: Se seleccionaron tres ramas representativas por árbol, tomando como muestra la sección inferior y superior de cada rama.
- Diámetro ≥ 7,0 cm: Se seleccionó una rama por árbol por ser ramas productivas, tomando una muestra de la sección inferior de la rama. Este tipo de muestreo no se realizó en los árboles de almendros, ya que por su estructura de pocas ramas, cortar una de esta envergadura supone una pérdida de producción de frutos importante en el árbol.

Caracterización física de la madera

Determinación de densidad

Se determinó la densidad básica según Kollmann (1959). La determinación de la densidad fue realizada por el teo-

rema de Arquímedes, siguiendo lo descrito por Olesen (1971), ya que se considera uno de los métodos más prácticos y exactos, así como el más utilizado para calcular la densidad de material leñoso de formas irregulares:

$$P_c = \frac{m_c}{m_c^*} P_a$$

Donde:

P_c : densidad del cuerpo (g/cm³)

P_a : densidad del agua (g/cm³)

m_c : masa del cuerpo (g)

m_c^* : masa relativa al valor de empuje del cuerpo en el agua (g)

Determinación de la humedad en estufa

En ramas de diámetro ≥ 7,0 cm no es posible seguir la especificación técnica EN 14774, en cuanto a la disposición en recipiente, debido a las mayores dimensiones e irregularidad de sus formas, por lo que en este aspecto se adaptó la metodología.

Así, las muestras fueron pesadas sobre una balanza de 0,1 mg de resolución, sin recipientes. Al ingresarlas a la mufla, solo se utilizó de base una placa de aluminio para evitar el contacto directo de las muestras con la mufla como precaución ante la posibilidad de desprendimiento de corteza. El contenido de humedad de la madera durante el secado se obtuvo utilizando la siguiente ecuación (Kollmann, 1959):

$$CH = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100$$

Donde:

CH : contenido de humedad (%)

P_h : peso húmedo (g)

P_s : peso secado en estufa (g)

Preparación de las muestras

Las muestras eran recién cortadas, y fueron llevadas directamente a laboratorio para su análisis, por lo que no habían logrado su secado natural. Hubo que secarlas, teniendo en cuenta que cuando la madera tiene agua, su poder calorífico se reduce, primero por el propio conte-



nido de agua y segundo porque parte de la energía calorífica de la madera se invierte en evaporar agua (Vignote y Martínez, 2006).

Para poder efectuar las pruebas siguientes fue necesario transformar las muestras en aserrín o fragmentos < 5 mm. En el caso de las muestras de diámetros < 7,0 cm se utilizó un triturador portátil marca Garland modelo BGS 2400, luego de ser triturado el material fue fragmentado en partes más pequeñas en un molino marca IKA-WERKE modelo M20 obteniendo el aserrín. En ramas con diámetros $\geq 7,0$ cm, una vez obtenidas las astillas (5 cm de longitud como máximo), se dejaron secar 2 días, para introducirlas en un martillo de trituración marca Oliotechnology modelo ETCR110 Trituradoras/afinadora 11 kW obteniéndose el aserrín (0,5 mm - 5 mm).

Caracterización química de la madera

Se realizó el análisis químico elemental y se identificaron algunos otros microcomponentes inorgánicos presentes en un análisis secundario. El análisis químico elemental se realizó en el laboratorio del Departamento de Química del ETSIAMN de la Universidad Politécnica de Valencia y el análisis químico secundario en el Instituto Agrario de la Generalitat Valenciana.

Análisis elemental

El material de análisis se dividió en restos de corta (árboles frutales) y árboles enteros (cultivo energético y especie forestal), según norma EN 14918.

Los elementos H, O, N, son utilizados principalmente para el cálculo del poder calorífico inferior (PCI). Aunque el C y el S no son requeridos en esta fórmula, se determinaron debido a las combinaciones que se pueden dar en diversas formas, principalmente con H, O y otras sustancias que pueden participar o no en la combustión (IDAE, 2007).

Análisis secundario

Era importante determinar el contenido de metales pesados que se encontraban incorporados en la madera, sobre todo en biomasa agrícola, a través de suelos agríco-

las contaminados. Por esto, se determinaron los siguientes elementos químicos que son monitoreados en la producción de *pellets* para uso doméstico (EN 14961-2):

- Determinación de elementos metálicos y azufre, utilizando en este estudio el método ICP (Inductively Coupled Plasma)
- Determinación de arsénico por fluorescencia
- Determinación de mercurio por espectroscopía de absorción atómica mediante analizador automático

Una vez obtenidos los resultados, se establecieron los niveles de concentración de estos elementos químicos, determinando si sus valores se encontraban dentro de los límites establecidos por las normas ya señaladas.

Caracterización energética de las astillas

Se evaluó la capacidad de las astillas como biocombustible sólido (*pellets*), esto se llevó a cabo en los laboratorios del Instituto de Ingeniería Energética (IIE) de la Universidad Politécnica de Valencia.

Se pretendía conocer el PCI y el porcentaje de cenizas. En la actualidad, las normas referentes a biocombustibles sólidos son desarrolladas por el AEN/CTN 164 (Jiménez y Sánchez, 2007), las usadas en este estudio fueron:

- EN 14918 EX Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico.
- EN 14961 EX Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles.
- EN 15234 EX Biocombustibles sólidos. Aseguramiento de la calidad del combustible.
- EN 14775 EX Biocombustibles Sólidos. Determinación del contenido de ceniza.

Poder calorífico

Con base en lo que dicta la norma EN 14918, se realizaron 33 pruebas en total a 0% de humedad.

El poder calorífico inferior (PCI) se puede calcular en base seca y libre de cenizas según la siguiente ecuación (norma UNE-CEN/TS 15234 EX):

$$q_{p,net,d} = q_{V,gr,d} - 212,2 \times w(H)_d - 0,8 \times [w(O)_d + w(N)_d]$$

Donde:

$q_{p,net,d}$: poder calorífico inferior de la materia seca a presión constante (MJ/kg);

$q_{V,gr,d}$: poder calorífico superior de materia seca (MJ/kg)

$w(H)_d$: contenido en hidrógeno, en porcentaje de masa, del biocombustible (seco) libre de humedad (incluyendo el hidrógeno del agua de hidratación de la materia mineral así como el hidrógeno en la sustancia del biocombustible)

$w(O)_d$: contenido en oxígeno, en porcentaje de masa, del biocombustible libre de humedad

$w(N)_d$: contenido en nitrógeno, en porcentaje en masa, del biocombustible libre de humedad

Cenizas

El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos térmicos de aprovechamiento de la biomasa que incluyen la combustión, es importante conocer el porcentaje contenido de ceniza en la biomasa, ya que en algunos procesos puede causar un deterioro de los equipos por formación de escorias.

El material (aserrín) fue clasificado de la misma forma que se hizo para el PC.

Se utilizó la norma UNE 14775 EX: 01. Método para la determinación del contenido de cenizas. Biocombustibles sólidos. Se pesó una pequeña cantidad de la muestra en una balanza de precisión Mettler Toledo (modelo AB

304-S/Fact, de 0,0001 g de resolución). Se desecó y posteriormente se incineró a $550\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ en una mufla marca Selecta modelo Select-Horn (con alcance de $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Tras determinar un periodo de tiempo, la muestra se acondicionó a temperatura ambiente y se volvió a pesar. El proceso se repitió hasta alcanzar peso constante.

Se calculó el contenido de cenizas como la cantidad de cenizas referidas a la muestra inicial desecada, por diferencia de peso y expresado en porcentaje.

Análisis de la astilla

Para determinar el potencial de cada especie para la fabricación de biocombustibles sólidos se analizaron los parámetros técnicos mínimos para este material: se tabularon para compararlos con lo que establece la normativa vigente y con base en el Manual para la certificación de *pellets* de madera para usos térmicos del Consejo Europeo del *Pellet* (2011), que tiene como referencia la norma EN 14961-2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización física

Los resultados de la caracterización física muestran la estadística descriptiva de ramas con diámetro $< 7,0\text{ cm}$ y $\geq 7,0\text{ cm}$ con respecto a la densidad básica.

Para el material de encina se obtuvo una densidad básica promedio de $0,732\text{ g/cm}^3$, con variación prácticamente nula entre individuos ($CV = 3,2\%$). Sin embargo, CPF (2004) y CREAM-DMAH (2011) obtuvieron valores pro-

TABLA 1. Densidad básica (kg m^{-3}) de las especies estudiadas.

Especies	Min	- σd	Prom.	+ σd	Max	CV (%)
<i>Q. ilex</i>	687...	709...	732...	756...	772...	3,2
<i>Paulownia spp.</i>	270...	267...	297...	327...	390...	10,1
<i>C. sinensis</i>	521...	549...	616...	684...	758...	10,9
<i>O. europaea</i>	549...	611...	654...	698...	717...	6,7
<i>P. amygdalus</i>	572...	620...	668...	715...	766...	7,1

medio de densidad básica de esta especie de 0,870 g/cm³, valor más alto que el obtenido en este estudio. Estas diferencias de densidad en una misma especie, según Gutiérrez *et al.* (2010) y Zobel y Talbert (1988) se deben principalmente a la influencia de las diferentes condiciones de sitio donde pudiese establecerse la especie, y en menor grado al control genético.

El valor de densidad básica del material del fuste de paulonia fue de 0,297 g/cm³, similar al obtenido por Hakan-Akyildiz y Sahin-Kol (2009) y por Sobhani *et al.* (2011) (0,272 g/cm³ y 0,260 g/cm³, respectivamente. La ligereza demostrada por la madera de paulonia se considera una ventaja importante, ya que en España, esta es la especie que posee la menor densidad con respecto a otros cultivos productores de madera, siendo *Populus spp.* la que le sigue en ligereza con valores de densidad entre 0,330 g/cm³ y 0,370 g/cm³ dependiendo de la localidad de procedencia (Jovanovski *et al.*, 2011; Díaz *et al.*, 2002).

En la tabla 1 se observa que, en promedio, en ramas de frutales las densidades básicas son uniformes, obteniéndose para naranjos 0,616 g/cm³, para olivos 0,654 g/cm³ y para almendros 0,668 g/cm³. Es importante resaltar que no existen estudios previos sobre la obtención de valores medios de densidad básica de estas especies, por lo que estos valores son pioneros.

Fernández (2009) estudió las mismas especies frutales evaluadas en este trabajo y provenientes de condiciones climáticas similares. Sin embargo, sus resultados de

densidad de madera de naranjos y de almendros fueron mucho más altos (1,002 g/cm³ y 0,981 g/cm³ respectivamente), aunque no especifica qué tipo de densidad se trata. En contraste, Passialis y Grigoriou (1999), si bien no evaluaron las mismas especies, obtuvieron datos de densidad básica para otras especies frutales como melocotón, manzano, cerezo, pero y damasco entre 0,65 g/cm³ a 0,75 g/cm³ que son valores más cercanos a los de este estudio.

Características químicas

Los resultados obtenidos en la composición química elemental de la madera de los tres tipos de árboles fueron comparados con los de literatura encontrada para las mismas especies. Sin embargo, en cuanto a la composición química secundaria no se encontraron estudios con los que comparar. Krook *et al.* (2004) han determinado valores para el fuste de las especies forestales más importantes del sector forestal europeo (*Pinus spp.* y *Picea spp.*). En este ítem se hizo una comparación de la concentración de los metales pesados para las especies en estudio *versus* lo publicado por esos autores, ya que resulta interesante conocer las diferencias y similitudes de los elementos químicos de las especies ensayadas, que no son tradicionalmente utilizadas en el sector forestal, con respecto a las especies que sí forman parte activa en este sector, proponiendo opciones para complementar a las especies forestales utilizadas tradicionalmente.

TABLA 2. Concentración de los elementos principales en muestras de fuste y ramas según la especie.

Elemento	EN 14918 (%)	<i>Q. ilex</i>	<i>Paulownia spp.</i>	<i>C. sinensis</i>	<i>O. europaea</i>	<i>P. amygdalus</i>
C	-	39,0	58,6	35,0	36,8	34,6
H	6,2 (fuste)	-	-	-	-	-
	6,1 (ramas)					
O	42 (fuste)	-	-	-	-	-
	41 (ramas)					
N	-	0,2	0,4	0,6	0,5	0,3
S	-	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02

Análisis elemental

Los valores promedio que se incluyen en la tabla 2 para H y O son los que establece la norma EN 14918 para material obtenido de los fustes de árboles enteros y se utilizó únicamente para el cálculo del PCI, ya que no están incluidos en las especificaciones técnicas para producción de *pellets*.

Para la encina, según Ponce y Cárdenas (2004), el porcentaje medio de C está entre 48% y 52% y de N entre 0,07% y 0,38%, siendo el primer valor mayor al obtenido en este estudio de C que es 39%. Sin embargo, los valores que presenta para N son similares al obtenido en esta investigación. Alves *et al.* (2009), para la madera de encina, obtienen 0,18% en N que es un valor muy cercano al encontrado en el fuste de esta especie. Sin embargo, Viejo-Montesinos *et al.* (1996) obtuvieron un valor medio de 0,63%. Esto indica que para este elemento se encuentran muchas variaciones.

Los valores de C, N y S obtenidos para paulonia se muestran en la tabla 2 y son similares a los obtenidos por Kasamaki (2007) quien obtuvo 49,5% para C; 0,24% para N y 0,02% para S, coincidiendo con los valores obtenidos por Esteban-Pascual *et al.*, (2007).

En ramas de frutales, al comparar los valores de la tabla 2 con la literatura, los resultados obtenidos son dispares. Sánchez *et al.* (2002), obtuvieron 45,5% para C, en cambio para N son bastante similares (0,03%) al igual

que en olivos y el S no lo detecta en la madera. Por ende, en general, la composición elemental de los frutales no difiere demasiado entre sí.

Análisis secundario

Según la tabla 3, casi todos los compuestos químicos analizados tuvieron presencia en la encina, a excepción de As y Pb, cuya presencia fue muy baja o inexistente, lo que los hizo imposibles de detectar.

Krook *et al.* (2004) han determinado valores del fuste para *Pinus* spp. y *Picea* spp. como las especies forestales de referencia para uso bioenergético en Europa. Según la tabla 3, presentan valores más bajos con respecto al fuste de encina en todos sus elementos excepto en As y Pb, por los motivos señalados anteriormente.

Como se puede observar en la tabla 3, al igual que en la encina, casi todos los compuestos químicos tuvieron presencia en paulonia, a excepción de Pb que fue inexistente o de muy baja presencia e imposible de detectar.

En general, el fuste de paulonia presentó valores más altos a los obtenidos por Krook *et al.* (2004), en todos sus elementos, excepto en As que son valores prácticamente iguales y en Pb que no estuvo presente en paulonia o su concentración fue menor a la señalada en la tabla, por lo que no fue detectado.

TABLA 3. Concentración de los componentes secundarios que pueden hallarse en las especies estudiadas.

Elemento	Unidad	Fuste <i>Pinus spp. y Picea spp.</i>	Fuste <i>Q. ilex</i>	Fuste <i>Paulownia spp.</i>	Ramas <i>C. sinensis</i>	Ramas <i>O. europaea</i>	Ramas <i>P. amygdalus</i>
Arsénico (As)	mg/kg	0,03	< 0,03	0,036	0,094	0,031	< 0,03
Cromo (Cr)	mg/kg	0,06	0,5	0,8	1,3	0,5	1,2
Plomo (Pb)	mg/kg	0,07	< 0,6	< 0,6	< 0,6	< 0,6	< 0,6
Mercurio (Hg)	mg/kg	0,06	2,7	1,5	3,3	2,8	1,9
Níquel (Ni)	mg/kg	0,01	0,3	1,1	0,7	0,3	0,4
Zinc (Zn)	mg/kg	9,6	3,8	19,7	6,0	9,8	14,7

* Krook *et al.* (2004)



Según la tabla 3, casi todos los compuestos químicos analizados tuvieron presencia en las especies frutales estudiadas, a excepción de Pb que fue inexistente o imposible de detectar, lo mismo ocurrió con el As en almendro. Los resultados indican que, en general, estos frutales presentan valores más altos con respecto a los obtenidos por Krook *et al.* (2004) para *Pinus* spp. y *Picea* spp. en todos sus elementos con las excepciones de As en almendros y Pb para todos los frutales, es decir que no están presentes o su concentración fue menor a la señalada en la tabla sin ser detectado. También la excepción se encuentra en Zn en naranjos donde se obtuvo un valor menor (6,0 mg/kg) que el autor de referencia (9,6 mg/kg).

Caracterización energética de la biomasa

Para la caracterización energética de la biomasa se determinó el PC (superior e inferior) expresado en MJ/kg y del porcentaje de cenizas en ramas agrupadas de acuerdo con sus diámetros ($< 7,0$ cm y $\geq 7,0$ cm).

Especie forestal mediterránea

Se determinó el PC en fuste, ramas con follaje y árbol completo de encina calculándose el PCI de los diferentes materiales como materia seca a 0% de humedad.

Se incluyeron en el análisis las ramas con follaje, ya que la defoliación es técnicamente complicada de realizar, por ende, sería muy costosa.

En la tabla 4 se aprecia que el material de fuste de *Quercus ilex* presentó el mayor PCI con 17,0 MJ/kg, seguido por biomasa del árbol completo con 16,41 MJ/kg y finalmente la biomasa de ramas con hojas con 16,22 MJ/kg.

Se realizó la prueba de *t* para comparar las medias entre fuste y ramas con hojas resultando una diferencia estadísticamente significativa entre sus medias con un nivel de confianza de 95,0%. Sin embargo, al realizar la prueba de *t* para comparar las medias obtenidas de biomasa de ramas con hojas y de árbol completo, no hubo diferencia estadísticamente significativa entre sus medias con el mismo nivel de confianza de 95,0%.

De lo anterior se concluye que el material leñoso del fuste tiene mayor PCI que el que presentaron los materiales provenientes de otras muestras (ramas con hojas y árbol completo), ya que según Rodríguez-Rivas (2009) un PC mayor se obtiene de material de especies que presentan mayor lignificación, que son más densas y que tienen mayor contenido de resinas, terpenos y aceites esenciales, explicándose así el por qué de la tendencia a la disminución del PCI cuando se incorporaron muestras con hojas.

Con respecto al porcentaje de cenizas, la tendencia indicó que la biomasa de fuste presentó el menor porcentaje de cenizas (1,8%) con respecto al de ramas con hojas que presentaron prácticamente el doble de cenizas (3,2%). De esto se concluye que el material más lignificado (fuste) presenta un porcentaje de cenizas más acorde con lo requerido por la norma EN 14775 ($\leq 1,5\%$).

De los resultados obtenidos se puede concluir que la incorporación del follaje a la materia prima para la producción de energía tendería a producir una disminución de su calidad para estos fines, con los perjuicios para las calderas ya explicados anteriormente. Este es un factor a tener en cuenta, ya que la encina es una especie perenne, por lo que si se quiere obtener una mayor calidad en el producto final con fines energéticos posteriormente al

TABLA 4. Descripción de propiedades energéticas de *Q. ilex*.

Material	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	Cenizas (%)
Fuste	18,35	17,00	1,8
Ramas c/hojas	17,57	16,22	3,2
Árbol completo	17,76	16,41	-

raleo se aconsejaría realizar una actividad de desrame, que sea previa al astillado o a cargar las trozas al camión para su transporte. Estos resultados no se pudieron contrastar con otros estudios de la misma especie o variedad de *Quercus ilex*, ya que la información específica al respecto es escasa. Sin embargo, resultados de material de otras especies de la familia de los *Quercus*, Bárcenas-Pazos *et al.* (2008) indican que en *Quercus sebifera* y *Q. tinkhami*, el porcentaje de cenizas promedio va de 2,7% a 3,2%, Bodirlau *et al.* (2007) obtuvieron en *Q. robur* entre 0,1% y 1,3% de cenizas. Para Fengel y Wegener (1984), en términos generales, las maderas de clima templado y frío están constituidas por 0,2% a 0,5% de cenizas.

Si bien estos resultados son diferentes con respecto a los obtenidos en este estudio, cabe destacar que, al menos, las condiciones de sitio y variedad de la especie son distintas a los bosques de encina muestreados. Así, por ejemplo, la variación del contenido de cenizas puede deberse a una adaptación fisiológica a condiciones de potencial hídrico de un suelo más o menos restrictivas (Bárcenas-Pazos *et al.*, 2008)

Cultivo energético leñoso

En paulonia la caracterización energética se determinó en el fuste y en ramas sin hojas. Se determinó el PCI del material en materia seca a 0% de humedad.

TABLA 5. Descripción de propiedades energéticas de *Paulownia* spp.

Material	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	Cenizas (%)
Fuste	17,4	16,1	1,1
Ramas	18,1	16,7	1,3

Los valores de la tabla 5 presentan los resultados obtenidos con material separado en fuste y ramas con un PCI de 16,1 MJ/kg para el fuste y el 16,7 MJ/kg en las ramas sin hojas.

Se realizó la prueba de *t* para comparar las medias de estos resultados entre fustes y ramas de esta especie, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas

entre sus medias con un nivel de confianza de 95%. Por lo anterior, es posible establecer un valor promedio para ambos tipos de muestra de 16,38 MJ/kg, siendo este valor aceptable según la norma (EN 14918).

Los valores obtenidos en este estudio son menores que los presentados por otros autores como Muñoz (2011) quién determinó 18,00 MJ/kg de PCI para paulonia, mientras que Lucas *et al.* (2010) obtuvieron 19,50 MJ/kg. Esta diferencia según Ince (1977) se puede deber a que la biomasa presenta un contenido de humedad más alto mientras esté más fresca, lo que contribuye a que el PC sea más bajo. Sin embargo, el material usado en laboratorio fue ensayado en base seca a 0% de humedad, por lo que las diferencias de PCI con respecto a los presentados por otros autores pueden ser atribuibles a otras causas, como a que las especies en forma individual presentan diferencias en la finalización de su actividad vegetativa y evolución según la estación del año (fenología) (Rodríguez-Rivas, 2009).

De los valores de cenizas de paulonia, presentados en la tabla 5 se observa que los resultados tienden a ser prácticamente iguales en los dos tipos de materiales (fuste y ramas), 1,1% para la fracción fuste y 1,3% en las ramas sin hojas.

Latorre y Ruano (2009) mencionan que para la mayoría de los cultivos energéticos se obtiene un porcentaje de cenizas que oscila entre 3% y 5%. Sin embargo, la norma EN 14775 señala que el contenido de cenizas no debe ser mayor a 1,5%, dato que paulonia cumplió satisfactoriamente (Tabla 5).

Los resultados obtenidos por otros autores como Kasamaki (2007) oscilaron entre 1,1% y 1,5%; para Latorre y Ruano (2009) estuvieron en torno a 2,0%; Muñoz (2011) obtuvo un porcentaje de cenizas de 1,7% y Yorgun *et al.* (2009) 1,1%, lo que corrobora los resultados obtenidos en este estudio.

El análisis de contenido de cenizas (%) permite determinar la cantidad de residuos acumulados en calderas tras la combustión de la biomasa (Latorre y Ruano, 2009) y, en vista de los resultados obtenidos (1,2%), el rendimiento de la caldera no se verá afectado (IDAE 2009).



Especies agrícolas leñosas

La caracterización energética se determinó en ramas de diámetro $< 7,0$ cm y $\geq 7,0$ cm.

TABLA 6. Descripción de propiedades energéticas de frutales.

<i>Especie</i>	<i>Clasif.</i> (cm)	<i>PCS</i> (MJ/kg)	<i>PCI</i> (MJ/kg)	<i>Cenizas</i> (%)
<i>C. sinensis</i>	$< 7,0$	16,0	14,7	2,8
	$\geq 7,0$	16,8	15,4	
<i>O. europaea</i>	$< 7,0$	17,4	16,0	2,4
	$\geq 7,0$	17,5	16,1	
<i>P. amygdalus</i>	$< 7,0$	18,2	16,9	1,0

Según la tabla 6, se puede inferir que las muestras de biomasa de olivos y almendros poseen un PCI aceptable (norma EN 14961-2) con valores que, si bien son menores a los requeridos para la obtención de *pellets* de calidad (16,5 MJ/kg) son similares. Sin embargo, el valor obtenido con la biomasa de naranjos es menor que el mínimo establecido en la norma, ya que el valor más alto obtenido fue de 15,4 MJ/kg.

Se realizó la prueba de *t* para comparar las medias de las muestras entre ramas de diámetros $< 7,0$ cm y $\geq 7,0$ cm de naranjos y olivos y no hubo diferencia estadísticamente significativa, para un nivel de confianza de 95,0%.

Los valores obtenidos están dentro del amplio intervalo establecido por IDAE (2005 y 2009), que para biomasa de olivo está entre 12,1 MJ/kg y 19,5 MJ/kg y en almendros entre 11,6 MJ/kg y 18,9 MJ/kg. Así mismo, existen varios autores que han determinado el PCS del material de estas especies, encontrando valores superiores a los obtenidos en este estudio. Por ejemplo, Fernández (2009) determinó para cítricos sin hojas (mandarinos y naranjos) un PCS de 17,4 MJ/kg; para olivos, Sánchez *et al.* (2002) obtuvieron 17,9 MJ/kg; para almendros González (2008) obtuvo 18,2 MJ/kg e IDAE (2005) 11,9 MJ/kg.

En cuanto al porcentaje de cenizas en frutales los valores que se presentan en la tabla 6, corresponden al material de mezcla de ramas de diámetros $< 7,0$ cm e indican que el proveniente de los naranjos presentó mayor

porcentaje de cenizas (2,8%), con respecto al que se determinó para la biomasa de olivos y almendros (2,4% y 1,0% respectivamente), siendo estos últimos los que menor cantidad de cenizas produjeron como residuo.

Otros autores han analizado cenizas de los residuos de podas de estas especies, pero no especifican los diámetros promedio que tenían las ramas de residuos, por lo que con fines de comparación con los resultados de este estudio se consideraron como resultados generales. Siendo así, Fernández (2009) obtuvo 5,2% de cenizas para residuos de naranjos y 0,8% para almendros, mientras que Sánchez *et al.* (2002) obtuvieron 1,5% para olivos. Estas cifras, con la excepción de lo obtenido para almendros, varían notablemente con respecto a las obtenidas para el material incluido en este estudio, debido a que el porcentaje de cenizas de la madera varía considerablemente con el clima, época del año, tipo de suelo, tipo de madera y especie, parte del árbol, y de la presencia de otros contaminantes adicionales como tierra y arena (Bárcenas-Pazos *et al.*, 2008). Como recomendación para el control en el aumento del porcentaje de cenizas, se aconseja que en la fase de la entrega de la materia prima en planta, los camiones de suministro de biomasa cumplan ciertos requisitos mínimos que aseguren una adecuada humedad durante la entrega, así como que incluyan equipamientos que permitan el pesado del combustible suministrado (IDAE, 2009).

Análisis del material como biocombustible sólido

A continuación, la tabla resumen determina el cumplimiento de los requisitos en la producción de *pellets* con base en los resultados obtenidos previamente de los distintos análisis realizados durante el desarrollo de esta investigación, siendo los resultados comparados con un estándar de valores dado por la norma para una calidad de *pellets* A2.

Cabe mencionar que la densidad medida corresponde a la astilla leñosa de las especies, sin embargo, por metodología, la confección de *pellets* densifica por presión el material, por lo tanto, si ya la madera cumple con una densidad igual o mayor a 600 kg m^{-3} , con la sola excepción de paulonia, es claro que el *pelletizado* de las astillas de la madera aumentará la densidad del *pellet*.

TABLA 7. Resumen de cumplimiento de requerimientos de la astilla para la producción de *pellets* según normas.

Propiedades del análisis	Unid.	Parámetros técnicos	Cumplimiento de normas				
			C.s.	O.e.	P.a.	P. spp.	Q.i.
Propiedades físicas							
Densidad	kg/m³	≥600 ¹	✓	✓	✓	✓	✓
Propiedades energéticas							
Cenizas	(%)	≤1,5 ¹	X	X	✓	✓	X
PC	MJ/kg	16,3≤Q≤19 ¹	X	✓	✓	✓	✓
Elementos químicos							
Nitrógeno (N)	%	≤0,5 ¹	X	✓	✓	✓	✓
Azufre (S)	%	<0,03 ¹	X	✓	✓	✓	✓
Arsénico (As)	mg/kg	≤1,0 ¹	✓	✓	✓	✓	✓
Cromo (Cr)	mg/kg	≤10,0 ¹	✓	✓	✓	✓	✓
Plomo (Pb)	mg/kg	≤10,0 ¹	✓	✓	✓	✓	✓
Mercurio (Hg)	mg/kg	≤0,1 ¹	✓	✓	✓	✓	✓
Níquel (Ni)	mg/kg	≤10,0 ¹	✓	✓	✓	✓	✓
Zinc (Zn)	mg/kg	≤10,0 ¹	✓	✓	✓	✓	✓

¹EN14961-2

Por lo que se presenta en la tabla 7 es posible concluir que, con excepción de la biomasa de naranjos, la de las otras especies analizadas cumple con la normativa para ser usadas como materia prima alternativa o de complemento a las ya probadas para la fabricación de *pellets*. Si bien la biomasa de olivos (2,4%) y encinas (1,8%) no cumplen con los límites establecidos en la norma (porcentaje de cenizas < 1,5) , la diferencia es mínima, al ser material complementario a las materias primas destinadas a estos usos, el porcentaje final de cenizas del *pellet*, en promedio, será menor que los obtenidos con la biomasa de estas dos especies.

CONCLUSIONES

La determinación de las propiedades físicas, químicas y energéticas señalan que las especies estudiadas cumplen, en general, con la normativa para la producción de *pellets* a partir de ellas. La excepción la podría constituir el naranjo que se muestra como la especie menos apta para

la confección de *pellets*, aunque esta no debe ser descartada, ya que su inclusión o no dentro de la producción de *pellets* estará supeditada a su porcentaje de participación.

Se muestra que todas las especies estudiadas, en términos generales, tienen el potencial energético como suministro complementario sostenido de biomasa agroforestal para la producción de biocombustibles sólidos (*pellets*). Cabe recordar que las especies analizadas en este estudio solo cumplirían la función de complemento como materia prima con respecto a *Pinus radiata* que es la especie forestal de principal explotación en Chile y la de mayor generación de residuos leñosos, lo cual debe ser aprovechado para la producción de *pellets* de forma masiva.

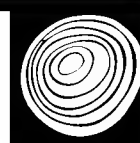
REFERENCIAS

AEMET (Asociación Española de Meteorología). 2014. Guía resumida del clima en España (1981-2010). Consultado 18 de agosto 2013. Disponible en <http://www.aemet.es/es/conocermas/publicaciones>

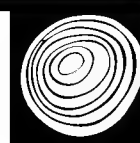


- Alves, C., C. Goncalves, A.P. Fernandes, L. Tarelho y C. Pio. 2009. Fireplace and woodstove fine particle emissions from combustion of western Mediterranean Wood types. *Atmospheric Research* 101:692-700
- Arroyo, M.T.K., L. Cavieres, C. Marticorena y M. Muñoz. 1995. Convergence in the mediterranean floras in central Chile and California: insights from comparative biogeography. In: M.T.K. Arroyo, P.H. Zedler y M.D. Fox, eds. Ecology and biogeography of Mediterranean ecosystems in Chile, California, and Australia. Springer-Verlag, Nueva York, NY. p:43-88.
- Bárcenas-Pazos, G.M., R. Ríos-Villa, J.R. Aguirre-Rivera, B.I. Juárez-Flores y J.A. Honorato. 2008. Composición química y densidad básica relativa de la madera de dos especies arbustivas de encino blanco en la Sierra de Álvarez, México. *Madera y Bosques* 14(3):81-94
- Bodirlau, R., I. Spiridion y C.A. Teaca. 2007. Chemical investigation of wood tree species in temperate forest in East Northern Romania. *Bioresources* 2(1):41-57
- Boydak, M. y M. Dogru. 1997. El intercambio de experiencias y los últimos adelantos en el manejo forestal sostenible por ecorregiones: Los bosques Mediterráneos. XI Congreso Forestal Mundial. Antalya, Turquía. 13-22 de octubre.
- Censo Agrario 1999. Los montes valencianos en cifras. Extracto del segundo inventario forestal de la Comunidad Valenciana. Valencia, España. Conselleria de Agricultura y Medio Ambiente. 51 p.
- CPF (Centre de la Propietat Forestal). 2004. L'inventari Forestal: Anexe indicadors dendromètrics. En Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient i Habitatge. Manual de redacció de plans tècnics de gestió i millora forestal (PTGMF) i plans simples de gestió forestal (PSGF). Instruccions de redacció i l'inventari forestal. Torrefurru, España. Abast. 216 p.
- CREAF-DMAH (Centre de Recerca Ecologica i Aplicacions Forestals – Direcció General del Medi Natural del Departament de Medi Ambient i Habitatge de la Generalitat de Catalunya). 2011. Sistema d'informació dels boscos de Catalunya. Consultado 5 de marzo 2012. Disponible en <http://www.creaf.uab.es/sibosc/>
- Díaz, B.J., L. Luna, G.D. Keil, M.E. Otaño y P.L. Peri. 2002. Tratamiento de la madera de *Populus nigra* cv. *Italica* ante la preservación con creosota y CCA. *Investigaciones Agrarias y Sistemas Forestales* 11(2):325-338.
- Domínguez-Lozano, F. y M.W. Schwartz. 2005. Comparative taxonomic structure of the floras of two Mediterranean-climate regions. *Diversity and Distributions* 11(5): 399-408.
- EN 14774-1: 2007 EX. Biocombustibles Sólidos: Determinación del contenido de humedad: Método de secado en estufa.
- EN 14961-2: 2011. Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Pellets de madera para uso no industrial.
- EN 14775: 2007 EX. Biocombustibles Sólidos: Método para la determinación del contenido de ceniza.
- EN 15103: 2007. Biocombustibles Sólidos: Métodos para la determinación de densidad aparente.
- EN 23103: 1978. Determinación del calor de combustión de los materiales de construcción mediante la bomba calorimétrica.
- EN 14918: 2011. Biocombustibles sólidos: Determinación del poder calorífico.
- Esteban-Pascual, L.S., R. García-Arambilet, R. Cabezón-González y J.E. Carrasco-García. 2007. Plan de aprovechamiento energético de la biomasa en las comarcas de El Bierzo y Laciana (León). CEDER-CIEMAT. 125 p.
- Falasca, S. y M. Bernabe. 2010. Aptitud agroclimática argentina para la implantación de bosques energéticos de *Paulownia spp.* *Revista Geográfica* (148):151-164
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2012. Activities related to poplar and willow cultivation and utilization in Serbia. 25 p.
- Fengel D. y G. Wegener. 1984. Wood: chemistry, ultrastructure, reaction. Walter de Gruyter & Co. Berlín, Alemania. 163 p.
- Fernández-Puratic, H. 2013. Valorización integral de la biomasa leñosa agroforestal a lo largo del gradiente altitudinal bajo condiciones mediterráneas. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. 354 p.
- Fernández, E. 2009. Análisis de los procesos de producción de biomasa residual procedente del cultivo de frutales medi-

- terráneos. Cuantificación, cosecha y caracterización para su uso energético o industrial. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- González, J. 2008. Centrales de calefacción y electricidad a partir de biomasa. Consultado 7 de junio 2012. Disponible en http://centrodeinvestigacionlaorden.gobex.es/archivos/calefaccion_y_electricidad_a_parit_de_biomasa.pdf
- GTZ/INFOR. 2007. Disponibilidad de Residuos Madereros: Residuos de la industria primaria de la madera. Disponibilidad para uso energético. ISBN: 978-956-7700-09-7. 122 p.
- Gutiérrez V., B., M. Gómez-Cárdenas y S. Valencia-Manzo. 2010. Wood density variation in natural populations of *Pinus ocarpa* Schiede Exschltdl. from the Chiapas State, México. *Fitotécnica Mexicana* 33(4):75-78
- Hakan-Akyildiz, M. y H. Sahin-Kol. 2009. Some technological properties and uses of paulownia (*Paulownia tomentosa* Steud.) wood. *Journal of Environmental Biology* 31(3):351-355.
- Hapla, F. y J. Saborowski. 1984. Überlegungen zur Wahl des Stichprobenumfangs bei Untersuchungen der physikalischen und technologischen Holzeigenschaften. *Forstarchiv* 55(4):135-138.
- IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía). 2007. Manuales de energías renovables: Energía de la biomasa. Consultado 15 feb. 2011. Disponible en: <http://www.idae.es/index.php/mod.documentos>
- IDEA (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía). 2009. Guía técnica de instalaciones de biomasa térmica en edificios. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España. 76 pp.
- Ince, P.J. 1977. Estimating effective heating value of wood or bark fuels at various moisture contents. Madison, Wisconsin: FPL 13. Forest Products Laboratory. U.S. Department of Agriculture. 9 p.
- Jiménez, L. y L. Sánchez. 2007. Consideraciones sobre el aprovechamiento de la biomasa forestal con fines energéticos, según el nuevo decreto 661/2007 por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen general. *Revista Técnica del Medio Ambiente* 20(120): 18-23.
- Jovanovski, A., G. Robles y M. Davel. 2011. Propiedades físicas de la madera de *Populus spp.* proveniente de cortinas forestales plantadas en Esquel, Chubut, Argentina. Jornadas de Salicáceas. Neuquén, Argentina. 6p.
- Kasamaki, P. 2007. La Paulownia como base de los cultivos energéticos. Consultado 8 mayo 2011. Disponible en <http://www.vicedex.com/pdf/paulownia.pdf>.
- Kollmann, F. 1959. Tecnología de la madera y sus aplicaciones. Tomo I. Ministerio de Agricultura. Instituto Forestal de Investigaciones, Experiencias y Servicios de la Madera. Madrid, España. 676 p.
- Krook, J., A. Matensson y M. Eklund. 2004. Metal contamination in recovered waste wood used as energy source in Sweden resources. *Conservation and Recycling* 41(1):1-14
- Latorre, B. y J.R. Ruano. 2009. Caracterización energética de la biomasa de *Paulownia spp.* procedente de plántulas cultivadas de una savia. *Montes* 98:77-82.
- Lucas, M., E. Martínez, F. García Morote, F. López Serrano y M. Andrés Abellán. 2010. El cultivo de Paulonia para la obtención de madera y biomasa en Castilla-La Mancha: Primeros resultados. *Foresta* 47/48:103-110
- Marcos, F. y M. Núñez. 2006. Biomasa forestal: fuente energética. *Energética XXI* IV(52):80-85.
- Ministerio de Energía de Chile. 2011. Balances energético 2002-2010. Consultado 2 julio 2013. Disponible en <http://www.cne.cl/estadisticas/balances-energeticos>
- Muñoz, F. 2011. Experiencias en plantaciones dendroenergéticas. Seminario: la energía del futuro viene de bosques. Colegio de Ing. Forestales. Talca, Chile. 40 p.
- Olesen, P.O. 1971. The Water Displacement Method, The Royal Veterinary and Agricultural University of Copenhagen, 18 p.
- Passialis, C. y A. Grigoriou. 1999. Technical properties of branch-wood of apple, peach, pear, apricot and cherry fruit trees. *Holz als Roh- und Werkstoff* 57:41-44.
- PGOF. 2004. Plan General de Ordenación Forestal de la Comunidad Valenciana. Conselleria de Medio Ambiente. Vol. 2003/43. Valencia, España.
- Ponce, M. y R. Cárdenas. 2004. Determinación de la importancia del consumo de leña por el sector industrial de la X región y sus implicancias ambientales. Boletín Técnico de la Universidad de Santiago de Chile. 66 p.



- Programa Chile Sustentable. 2012. Un Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética para Chile Consultado 24 noviembre 2010. Disponible en <http://www.chilesustentable.net/category/publicaciones/energia-y-proteccion-del-clima/>
- Rodríguez-Rivas, A. 2009. Estudios de valoración energética de combustibles forestales para la prevención de incendios forestales en la Sierra de la Primavera (Jalisco, México) mediante calorimetría de combustión y ensayos de inflamabilidad. Santiago de Compostela: Universidade. Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico. 128 p.
- Rojas, M. 2004. Prefactibilidad técnica y económica para la instalación de una planta de pellets para combustibles a partir de desechos de madera. Tesis Ing. Forestal. Santiago, Chile. Universidad de Chile. Escuela de Ciencias Forestales: 22-26 p.
- Sánchez, S., A.J. Moya, M. Moya, I. Romero, R. Torrero y V. Bravo 2002. Aprovechamiento del residuo de poda del olivar. *Ingeniería Química* 34(391):194-202.
- Santibáñez, F. y J.M. Uribe. 1992. Atlas agroclimático de Chile: Región V y Metropolitana. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Santiago.
- Sobhani, M., A. Khazaeian, T. Tabarsa y A. Shakeri. 2011. Evaluation of physical and mechanical properties of paulownia wood core and fiberglass surfaces sandwich panel. *Key Engineering Materials* 471-472: 85-90
- Tolosana, E. 2009. Manual técnico para el aprovechamiento y elaboración de biomasa forestal. Madrid. FUCOVASA/Mundi-prensa. 348 p.
- Verdú, M., y P. Garcia-Fayos. 2002. Ecología reproductiva de *Pistacia lentiscus* L. (Anacardiaceae): un anacronismo evolutivo en el matorral mediterráneo. *Revista Chilena de Historia Natural* 75(1):57-65.
- Viejo-Montesinos, J.L., F. Molino-Olmedo y J. Marín. 1996. Variación del contenido de carbono y nitrógeno a lo largo del proceso de putrefacción de la madera de *Quercus*, *Pinus* y *Abies* en Andalucía. Tomo extraordinario, 125 Aniversario de la RSEHN. *Boletín de la Real Sociedad de Historia Natural* 455-458.
- Vignote, S. e I. Martínez. 2006. Tecnología de la madera. Mundi-prensa. Madrid. 678 p.
- Zobel, B. y J. Talbert. 1998. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Limusa. México. 545 p.
- Manuscrito recibido el 17 de octubre de 2013.
Aceptado el 28 de mayo de 2014.
- Este documento se debe citar como:
Fernández-Puratich, H., J.V. Oliver-Villanueva, M. Valiente, S. Verdú, y N. Albert. 2014. Desarrollo de *pellets* a partir de tres especies leñosas bajo condiciones mediterráneas. *Madera y Bosques* 20(3):97-111.



Comportamiento elástico de la madera de *Acer rubrum* y de *Abies balsamea*

Elastic behavior of *Acer rubrum* and *Abies balsamea* wood

Saúl Antonio Hernández-Maldonado¹ y Javier Ramón Sotomayor-Castellanos²

¹ University of New Brunswick, Canada. saul.008@gmail.com

² Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. madera999@yahoo.com

RESUMEN

El diseño de productos con alto valor agregado y el cálculo de estructuras en madera requieren de características elásticas confiables y relacionadas con un modelo teórico el cual explique de manera racional el comportamiento elástico de la madera. Se presentan la metodología y los resultados de la determinación experimental de las características elásticas de dos maderas canadienses: *Acer rubrum* y *Abies balsamea*. Las características examinadas fueron: módulos de elasticidad, módulos de rigidez y coeficientes de Poisson. Se realizaron experimentos de compresión, en el dominio elástico, de las direcciones de ortotropía de la madera: radial, tangencial y longitudinal. El contenido de humedad fue de 9% para *A. rubrum* y de 10% para *A. balsamea*. Las densidades de las maderas fueron de 651 kg/m³ y 393 kg/m³ respectivamente. A partir de las características obtenidas empíricamente, se analizaron las propiedades y las relaciones de ortotropía de la matriz de constantes elásticas del modelo elástico general. Los valores experimentales de las características elásticas de las maderas de *A. rubrum* y de *A. balsamea*, son comparables con valores correspondientes a estas maderas determinados en otros estudios. Igualmente, se demostró que los postulados de ortotropía del modelo elástico general son –con cierto nivel de confianza– válidos.

PALABRAS CLAVE: coeficiente de Poisson, modelo elástico, módulo de elasticidad, módulo de rigidez, ortotropía.

ABSTRACT

This design of high value-added products and the calculus of structures in wood requires reliable elastic characteristics related to a theoretical model that explains in a rational way the elastic behavior of wood. This research presents the methodology and the results of the experimental determination of the elastic characteristics of two Canadian woods: *Acer rubrum* and *Abies balsamea*. The characteristics examined were modulus of elasticity, modulus of rigidity and Poisson's ratio. Compression tests within the elastic regime were performed in the orthotropic directions of wood: radial tangential and longitudinal. The moisture content of *A. rubrum* was 9% and 10% for *A. balsamea*. The densities were 651 kg/m³ and 393 kg/m³ respectively. With the empirically obtained characteristics, the properties and orthotropic relations of the elastic constants matrix of the general elastic model were analyzed. The experimental values of the elastic characteristics of *A. rubrum* and of *A. balsamea* woods are comparable with values corresponding to these woods determined in other studies. Likewise, it was proved that the orthotropic postulates of the general elastic model are –within some confidence level– valid.

KEYWORDS: Poisson's ratio, elastic model, modulus of elasticity, modulus of rigidity, orthotropy.

INTRODUCCIÓN

Esta investigación presenta la metodología y los resultados de la determinación experimental de las características elásticas de dos especies de madera canadienses. Las especies estudiadas fueron *Acer rubrum* (Angiosperma) y *Abies balsamea* (Gimnosperma). Las características estu-

diadas fueron: módulos de elasticidad, módulos de rigidez y coeficientes de Poisson. A partir de las características obtenidas empíricamente, se analizaron las propiedades de ortotropía de la matriz de constantes elásticas del modelo elástico general.

Modelo elástico general

El comportamiento elástico de la madera es caracterizado por la ecuación constitutiva que expresa la ley de Hooke generalizada para un sólido elástico que posee simetrías materiales de tipo ortotrópico. El modelo elástico general del comportamiento elástico de la madera, a partir de la ley general de comportamiento elástico es:

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl}$$

Donde:

ε_{ij} = Tensor de deformaciones.

S_{ijkl} = Tensor de constantes elásticas.

σ_{kl} = Tensor de esfuerzos.

con $i, j, k, l \in \{1, 2, 3\}$ por convención de índices repetidos.

Para el caso de la madera, idealizada como un sólido elástico, macroscópicamente homogéneo, de medio continuo y con simetrías materiales y elásticas de tipo ortotrópico, esta ley de comportamiento, se admite y se escribe con notación reducida de índices, como:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix}$$

Con las simetrías:

$$S_{12} = S_{21}$$

$$S_{13} = S_{31}$$

$$S_{23} = S_{32}$$

Donde:

ε = Deformación unitaria

σ = Esfuerzo normal

τ = Esfuerzo cortante

Las constantes de elasticidad S_{ij} se pueden expresar en términos de las características elásticas de la madera en el sistema de coordenadas

$\{1, 2, 3\} : \{R, T, L\}$, como:

$$S_{11} = 1 / E_R$$

$$S_{22} = 1 / E_T$$

$$S_{33} = 1 / E_L$$

$$S_{44} = 1 / G_{TL}$$

$$S_{55} = 1 / G_{LR}$$

$$S_{66} = 1 / G_{RT}$$

$$S_{12} = -\nu_{TR} / E_T = S_{21} = -\nu_{RT} / E_R$$

$$S_{23} = -\nu_{LT} / E_L = S_{32} = -\nu_{TL} / E_T$$

$$S_{13} = -\nu_{LR} / E_L = S_{31} = -\nu_{RL} / E_R$$

Donde:

R = Dirección radial

T = Dirección tangencial

L = Dirección longitudinal

E = Módulo de elasticidad

G = Módulo de rigidez

ν = Coeficiente de Poisson

Empleando las ecuaciones precedentes y aplicando las hipótesis simplificadoras de elasticidad, homogeneidad, medio continuo y simetrías materiales y elásticas ortotrópicas, la ley de comportamiento elástico de la madera se escribe en términos de las características elásticas de la madera como:

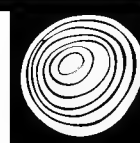
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_L \\ \varepsilon_{TL} \\ \varepsilon_{LR} \\ \varepsilon_{RT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_R} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T} & \frac{-\nu_{LR}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{RL}}{E_R} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_L \\ \tau_{TL} \\ \tau_{LR} \\ \tau_{TR} \end{bmatrix}$$

y con las simetrías:

$$-\nu_{TR} / E_T = -\nu_{RT} / E_R$$

$$-\nu_{LT} / E_L = -\nu_{TL} / E_T$$

$$-\nu_{LR} / E_L = -\nu_{RL} / E_R$$



Bases de datos experimentales

Los datos de Hearmon (1948), Bodig y Goodman (1973) y Guitard y El Amri (1987) forman las 3 bases de datos de referencia reconocidas mundialmente. Hearmon recopiló datos para 18 maderas de especies angiospermas y 11 gimnospermas. Bodig y Goodman presentaron datos de 58 maderas de especies angiospermas y 71 gimnospermas. Guitard y El Amri recopilaron información de 43 maderas de especies angiospermas y 37 gimnospermas.

Por otra parte, distintos autores han presentado recientemente resultados experimentales y de modelización de características elásticas de maderas:

Bucur y Archer (1984) utilizaron un método de ultrasonido para determinar los módulos de elasticidad y de rigidez, así como los coeficientes de Poisson de 3 especies gimnospermas y 3 angiospermas. Bucur y Archer confirmaron la utilidad de las pruebas de ultrasonido en la determinación de las características elásticas de la madera. Igualmente los autores concluyen que la heterogeneidad y variación de la estructura anatómica de la madera limita la exactitud de las mediciones.

Sliker (1989), Sliker y Yu (1993) y Sliker *et al.* (1994), por medio de pruebas de compresión, tensión y cortante, determinaron los módulos de elasticidad, de rigidez y los coeficientes de Poisson para 25 maderas angiospermas y 5 maderas gimnospermas. Estos autores, confirmaron la utilidad de los sensores de deformación de resistencia eléctrica para medir deformaciones unitarias en la madera. Además los investigadores pusieron en evidencia el carácter ortotrópico de la madera y la variabilidad en los parámetros medidos al interior de cada especie.

Zink *et al.* (1997) utilizaron la técnica de correlación de imagen digital para medir coeficientes de Poisson en madera de *Liriodendron tulipifera* (angiosperma). Esta técnica permite visualizar el plano en estudio y de esta forma observar el fenómeno de deformación de manera más completa, en comparación con las medidas puntuales obtenidas utilizando sensores de deformación de resistencia eléctrica. Los investigadores notaron que el valor del coeficiente de Poisson no es constante durante el proceso carga-deformación del ensayo.

Liyu y Zhenyou (2004) estudiaron el carácter ortotrópico de la madera de *Betula platyphylla* Suk. (Angiosperma). Utilizando sensores de deformación de resistencia eléctrica, determinaron los módulos de elasticidad y rigidez, así como los módulos de Poisson correspondientes. En sus conclusiones, Liyu y Zhenyou comentan la influencia de la capa de adhesivo en el funcionamiento de los sensores de deformación. Igualmente los investigadores confirman las propiedades ortotrópicas de la madera.

Mascia (2003) y Mascia y Lahr (2006) realizaron pruebas de compresión en 2 maderas angiospermas y 2 especies gimnospermas. Los investigadores concluyeron que las predicciones de las componentes del tensor constitutivo del modelo elástico de la madera, son congruentes con los valores experimentales de la madera considerada como un material ortotrópico y de medio continuo. Igualmente los autores hacen notar que la variación angular en la dirección longitudinal de la madera influye en los valores de los componentes del tensor constitutivo del modelo elástico de la madera.

Keunecke *et al.* (2008) estudiaron el comportamiento elástico tridimensional de la madera. Los autores aplicaron pruebas de tensión en madera de *Taxus baccata* L. (angiosperma) y *Picea abies* (L.) Karst. (Gimnosperma). Los investigadores determinaron las 12 características elásticas de la madera necesarias para configurar la matriz de constantes elásticas. Entre sus principales conclusiones, Keunecke y colaboradores confirmaron el comportamiento ortotrópico de la madera de las especies estudiadas.

Laghdar *et al.* (2008) desarrollaron una técnica para determinar el tensor de elasticidad tridimensional de la madera aplicado al modelado de esfuerzos de secado. Los investigadores trabajaron con la madera de *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. (gimnosperma). Los analistas validaron una técnica con un sensor de deformaciones reutilizable.

Niemz y Caduff (2008) determinaron para la madera de *Picea abies* (L.) Karst, los tres módulos de elasticidad y los seis coeficientes de Poisson utilizando un sensor de desplazamiento incremental en pruebas de tensión. Los autores validaron este método para la obtención de características elásticas de la madera.

Es importante remarcar que los diferentes autores consultados, han trabajado con el paradigma del modelo elástico general, el cual considera a la madera como un material sólido, elástico, macroscópicamente homogéneo, de medio continuo y con una ortotropía material y elástica de tipo cilíndrica.

Modelos de predicción

Sliker y Yu (1993) y Sliker *et al.* (1994) propusieron modelos de predicción lineales para estimar características elásticas de maderas angiospermas, empleando como variable independiente la densidad del material. Las pruebas realizadas en tensión utilizaron probetas recortadas de placas. Para las pruebas de compresión, los autores utilizaron probetas compuestas de cubos de madera. El contenido de humedad fue de 12%.

Mackenzie-Helnwein *et al.* (2005) realizaron pruebas en compresión y tensión biaxiales y mixtas de maderas de gimnospermas. A partir de sus resultados, los investigadores proponen modelos de predicción lineales para módulos de elasticidad, de rigidez y para coeficientes de Poisson. La característica de referencia de la madera fue su densidad. El contenido de humedad fue de 12%.

Hernández-Maldonado (2010) estableció modelos estadísticos para predecir teóricamente valores de las características elásticas de la madera, a partir de un parámetro simple e intrínseco de la madera como es la densidad. Para seleccionar el tipo de regresión que será el modelo de predicción, realizó un estudio comparativo entre varios modelos estadísticos. Los modelos analizados fueron regresiones simples (lineales y exponenciales), múltiples y polinomiales. El modelo estadístico seleccionado fue del tipo:

$$CE = a \rho$$

Donde:

CE = Característica elástica

ρ = Densidad de la madera (g/cm^3)

a = Constante particular a cada grupo taxonómico y característica elástica

A manera de síntesis, se puede decir que el modelo elástico de la madera es aplicado de manera generalizada en las ciencias e ingeniería de la madera. En el mismo contexto, los datos experimentales de las características elásticas de la madera han sido calculados para especies con una amplia diversidad en los protocolos experimentales para su determinación. A excepción de la información contenida en las bases de datos, la información está dispersa en libros, tesis y artículos científicos. Esta problemática sugiere verificar experimentalmente la congruencia los valores existentes en la literatura.

OBJETIVO

Determinar experimentalmente los valores de las características elásticas módulos de elasticidad, módulos de rigidez y coeficientes de Poisson, de la madera de *A. rubrum* y de *A. balsamea*.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material experimental consistió en madera de *A. rubrum* L. (Red Maple) y *A. Balsamea* (L.) Mill. (Balsam). Estas maderas están descritas entre otros autores, por Mullins y McKnight (1982), Lincoln (1986), Gilman y Watson (1993), Miller (1999), Spelter (2005) y Zerbe (2005).

Las dos especies de madera se seleccionaron con objeto de estudiar dos especies de divisiones taxonómicas distintas: angiospermas (*A. rubrum*) y gimnospermas (*A. Balsamea*). De esta forma se obtuvieron dos muestras con densidades diferentes y anatomías distintas. Las dos maderas tienen características tecnológicas contrastables y son de uso generalizado en Canadá y en los Estados Unidos de América.

A partir de piezas de madera sólida, adquiridas en aserraderos localizados en la Provincia de New Brunswick, Canadá, se elaboraron dos grupos de probetas. Los especímenes fueron de pequeñas dimensiones y libres de particularidades de crecimiento, adaptando las especificaciones de la norma ASTM D143-94 (ASTM, 2009). La orientación de las aristas de las probetas fue paralela a las direcciones de ortotropía radial, tangencial y longitudinal



del plano leñoso y sus dimensiones variaron de acuerdo con la combinación de su orientación y con la dirección de la sollicitación (Fig. 1). Las probetas se prepararon en una cámara de acondicionamiento a un contenido de humedad de 9% para *A. rubrum* y de 10% para *A. balsamea*. Las configuraciones de las pruebas para una probeta de *A. rubrum* se ilustran en la figura 1.

Una serie de pruebas exploratorias de compresión, se realizaron con el objetivo de determinar el dominio elástico del proceso carga-deformación, para que las mediciones de las pruebas siguientes, se realizaran en un intervalo de aproximadamente 40% a 60% del límite elástico de la madera (Fig. 2). De esta manera, las pruebas adquirieron un carácter no destructivo. Utilizando probetas adicionales

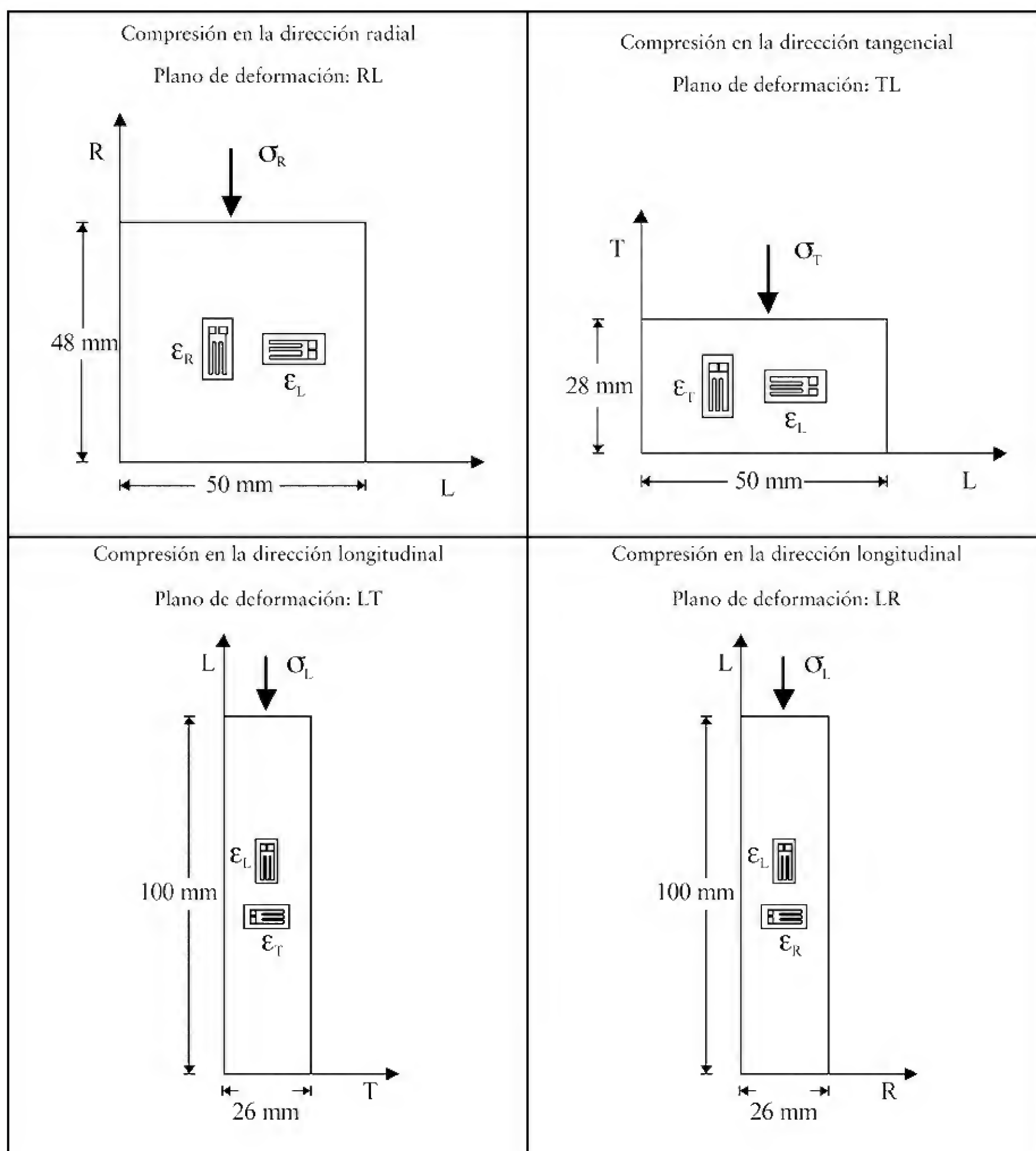


FIGURA 1. Configuración de las pruebas de compresión.

les, se calcularon la densidad aparente (ρ) y el contenido de humedad de la madera (H) adaptando las especificaciones de la norma ASTM D143-94 (ASTM, 2009).

Las pruebas de compresión llevadas a la ruptura se realizaron en conjuntos de tres ejemplares, orientados en cada dirección de ortotropía de la madera: radial, tangencial y longitudinal. Cada conjunto correspondió a ensayos de compresión radial, tangencial y longitudinal.

En cada probeta se colocaron dos sensores de deformación de resistencia eléctrica en uno de los planos paralelos a la dirección de la sollicitación (Fig. 1). Un sensor estuvo orientado de tal forma que midiera la deformación en la dirección colineal al sentido de la carga. El segundo sensor fue colocado de manera que captara las deformaciones en la dirección perpendicular a la dirección de la compresión.

Para los ensayos en compresión longitudinal, se colocaron cuatro sensores en los planos paralelos a la dirección de la carga y adyacentes entre sí. De esta forma se capturaron simultáneamente las deformaciones en dos direcciones de anisotropía en planos paralelos a la carga.

Los parámetros que se midieron durante cada una de las pruebas de compresión fueron: la carga de compresión, el área resistente a la aplicación de la carga, y las deformaciones resultantes en las direcciones paralelas y perpendiculares, respecto a la orientación de la sollicitación. Los módulos de elasticidad y los coeficientes de Poisson corres-

pondientes a cada prueba se calcularon a partir de las correlaciones estadísticas de los datos correspondientes al intervalo elástico de los diagramas esfuerzo-deformación (Fig. 2) y deformación-deformación (Fig. 3).

Para medir las deformaciones coaxial y normal a la dirección de la carga, se colocaron sensores de deformación de resistencia eléctrica CEA-06-500UW-350 de tecnología *Vishay Micro-Measurements*®. Los sensores se posicionaron en los planos correspondientes y explicados en la figura 1.

La técnica de preparación y colocación de los sensores siguió los procedimientos especificados en las notas técnicas B-129-8 y TN-505-4 (*Vishay Micro-Measurements*, 1989 y 2009) y en el boletín B-127-14 (*Vishay Micro-Measurements*, 2005) de *Vishay Micro-Measurements*®.

Para aplicar la sollicitación en compresión, se utilizó una maquina universal de pruebas mecánicas MTS 810 de tecnología *MTS Systems Corporation*®.

La medición de las deformaciones se realizó conectando los sensores de deformación a un medidor de deformaciones P3 de tecnología *Vishay Micro-Measurements*®.

Para la captura de datos de la carga aplicada a las probetas y de las deformaciones correspondientes, se conectaron la maquina universal y el medidor de deformaciones a un sistema de cómputo. El tratamiento posterior de datos se realizó utilizando un paquete comercial estadístico computarizado.

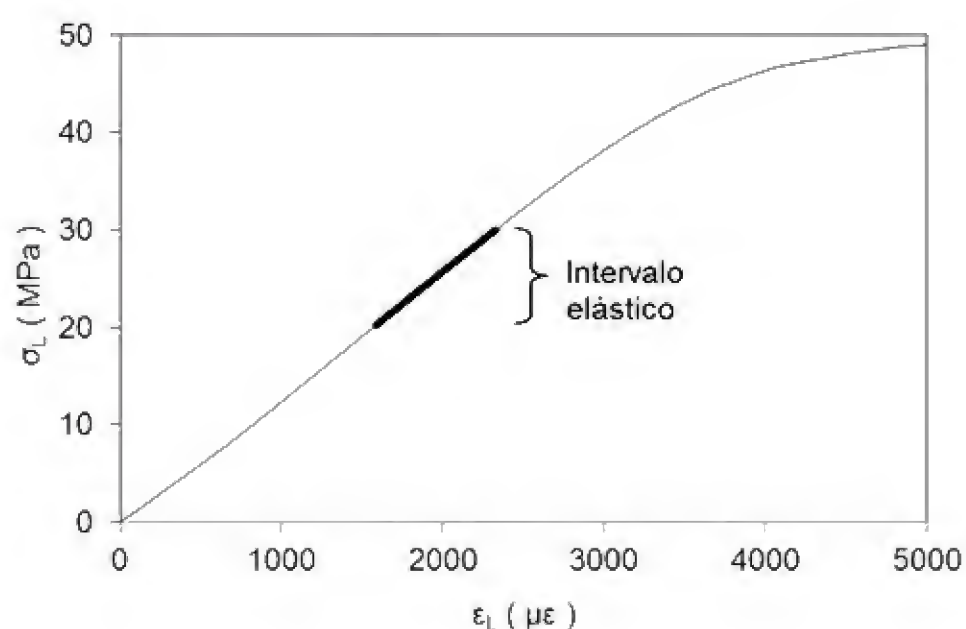


FIGURA 2. Diagrama esfuerzo-deformación.

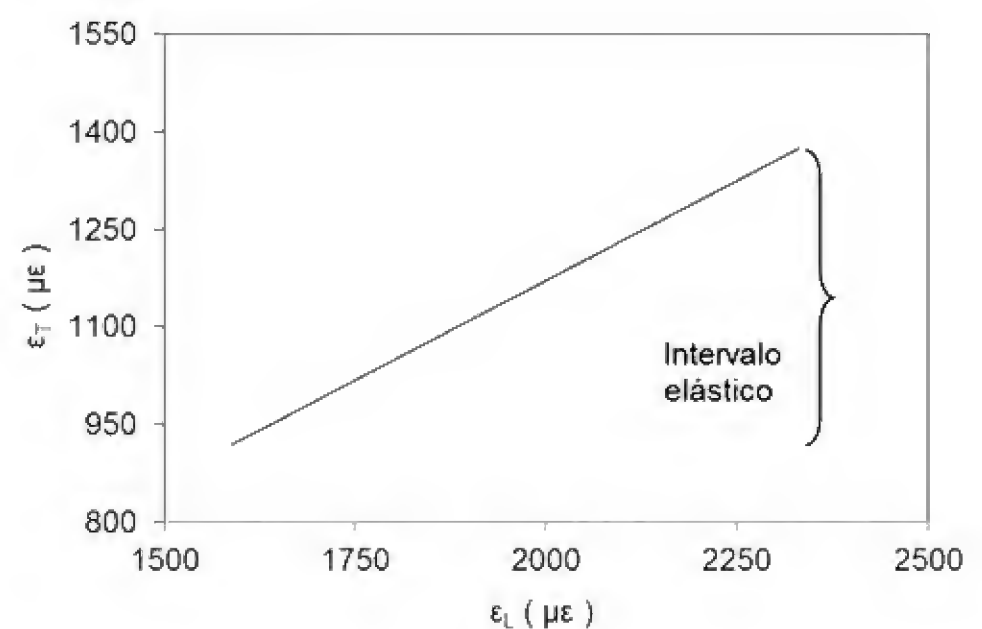


FIGURA 3. Diagrama deformación-deformación.

RESULTADOS

La tabla 1 presenta los resultados de las pruebas de compresión. Los valores experimentales de v_{RT} , v_{TR} no se presentan debido a dificultades en la adhesión de los sensores en el plano transversal (RT) a la dirección de la fibra de la madera, lo que podría alterar los datos. Los estadígrafos son: x media aritmética, σ desviación estándar y CV coeficiente de variación. Como valores de referencia, se presentan datos de Bodig y Goodman (1973).

En la tabla 1, G_{TL} , G_{LR} y G_{RT} son los módulos de rigidez calculados a partir de los datos experimentales, con las relaciones propuestas por Lekhnitskii (1963) y verificadas por Mackenzie-Helnwein *et al.* (2005):

$$G_{ij} = \frac{E_i E_j}{E_i - E_j 2\nu_{ij} E_j}$$

Donde:

- G_{ij} = Módulo de rigidez para el plano ij (MPa).
- E_i = Módulo de elasticidad en la dirección i (MPa).

- E_j = Módulo de elasticidad en la dirección j (MPa).
- ν_{ij} = Coeficiente de Poisson en el plano ij .

DISCUSIÓN

Las diferencias aritméticas entre los valores experimentales de las características elásticas obtenidas en el presente trabajo, comparados con los valores bibliográficos de Bodig y Goodman (1973) son importantes. No obstante, los datos aquí obtenidos para *A. rubrum* y *A. balsamea*, se localizan dentro del intervalo de dispersión de los datos bibliográficos; a excepción del valor del módulo de rigidez en al plano RT para *A. balsamea*, el cual se localiza por arriba de las predicciones. Además, para el caso de los coeficientes de Poisson, los resultados presentan tendencias similares a las de los módulos de elasticidad y de rigidez. Es decir, estos valores se distribuyen en regiones que giran alrededor de las estimaciones de trabajos anteriores. No obstante, las diferencias entre las características experimentales aquí obtenidas y los valores promedio de las bases de datos y sus coeficientes de variación son aceptables en relación con los intervalos de variación entre las características mecánicas de la madera estimadas por el

TABLA 1. Módulos de elasticidad y rigidez obtenidos para la madera de *A. rubrum* y *A. balsamea*.

	ρ	H	E_p	E_T	E_L	G_{TL}	G_{LR}	G_{RT}	v_{RT}	v_{TR}	v_{RL}	v_{LR}	v_{TL}	v_{LT}
	kg/m^3	%	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa						
<i>A. rubrum</i>														
x	651	9,0	1431	960	11879	826	1138	354	-	-	0,063	0,525	0,041	0,550
σ	-	-	230	85	1637	72	114	26	-	-	0,0056	0,0237	0,0022	0,0459
CV	-	-	0,16	0,09	0,14	0,09	0,10	0,07	-	-	0,09	0,05	0,05	0,08
<i>A. rubrum</i> (Bodig y Goodman, 1973)														
x	500	11,4	1122	550	12480	639	869	212	0,733	0,360	0,037	0,412	0,023	0,531
<i>A. balsamea</i>														
x	393	10,0	861	633	11617	575	745	261	-	-	0,025	0,451	0,022	0,464
σ	-	-	296	109	752	87	229	72	-	-	0,0056	0,0147	0,0055	0,0541
CV	-	-	0,34	0,17	0,06	0,15	0,31	0,27	-	-	0,22	0,03	0,25	0,12
<i>A. balsamea</i> (Bodig y Goodman, 1973)														
x	340	12,0	743	421	9336	615	640	56	0,481	0,272	0,036	0,450	0,024	0,536

Laboratorio de Productos Forestales de los Estados Unidos de América (FPL, 1999).

Por otra parte, la magnitud de la variación para *A. balsamea*, es del mismo orden que la de la variación presentada por Bucur y Rasolofosaon (1998), de 5% a 15% para maderas de los géneros *Quercus* y *Pinus*. Para el caso de *A. rubrum*, la variación de los términos diagonales es más grande. Aún más, las diferencias aritméticas entre resultados bibliográficos y de laboratorio, son más evidentes, si se comparan los valores de las características elásticas para cada especie estudiada. Este resultado es particularmente notorio para los valores de los coeficientes de Poisson.

Respecto a la anisotropía de las características elásticas, las relaciones entre ellas son, para *A. rubrum*:

$$\begin{aligned} E_L &\gg E_R > E_T : 11879 \gg 1431 > 960 \\ G_{LR} &\gg G_{TL} > G_{RT} : 1138 \gg 826 > 354 \\ v_{RT} &> v_{LT} > v_{LR} \approx v_{TR} \gg v_{RL} > v_{TL} : 0,756 > 0,550 > 0,525 \\ &\approx 0,388 \gg 0,063 > 0,041 \end{aligned}$$

y para *A. balsamea*:

$$\begin{aligned} E_L &\gg E_R > E_T : 11617 \gg 861 > 633 \\ G_{LR} &\gg G_{TL} > G_{RT} : 745 \gg 575 > 74 \\ v_{RT} &> v_{LT} > v_{LR} \approx v_{TR} \gg v_{RL} > v_{TL} : 0,456 > 0,464 > 0,451 \\ &\approx 0,297 \gg 0,025 > 0,022 \end{aligned}$$

Las proporciones anteriores coinciden con las de Guitard (1987), a excepción de v_{RT} que es un valor estimado, lo cual puede explicar que es menor que v_{LT} . Estos resultados confirman los requerimientos del modelo elástico general con respecto a las relaciones de anisotropía observadas en la madera.

Estos resultados sugieren una variabilidad en la magnitud de los parámetros de ingeniería, a partir de los cuales se calculan las constantes de las matrices de elasticidad de la madera. Es decir, los datos experimentales son congruentes pero denotan una variabilidad inherente al material. Estas discrepancias entre resultados pueden ser explicadas por los siguientes argumentos:

El origen de la variación sistémica en la magnitud de los parámetros de Ingeniería de la madera, puede ser atribuido a la variación de las características mecánicas que existe entre especies, al interior de una especie y según el espécimen de madera examinado. Igualmente, influye la localización en el fuste del árbol y las particularidades de crecimiento de la madera con la que están elaboradas las probetas (Mattheck y Kubler, 1997, Wodzicki, 2001 y Barnett y Jeronimidis, 2003).

Las diferencias entre los contenidos de humedad y las densidades de la madera influyen en los resultados (Brown *et al.* (1952), Dinwoodie (1981), Tsoumis (1991) y Forest Products Laboratory (1999).

Los datos derivados de los modelos de predicción propuestos por Hernández-Maldonado (2010), se refieren a madera con un contenido de humedad de 12%. En contraste, el contenido de humedad de las probetas de este estudio fue de entre 9% y 10%. Igualmente, las densidades presentadas por Bodig y Goodman (1973) son distintas a las densidades de la madera de *A. rubrum* y *A. balsamea* aquí encontradas.

Respecto a las experiencias realizadas, otra fuente de variación entre los resultados teóricos y experimentales son las diferentes configuraciones de los ensayos con los cuales se determinaron las características recopiladas para los modelos de predicción.

Los métodos de laboratorio referidos o utilizados por Hearmon (1948), Bodig y Goodman (1973) y Guitard y El Amri (1987), son variados y distintos a la configuración de las pruebas de compresión realizadas en esta investigación. Es decir, el tipo, la dirección y la velocidad de las solicitaciones aplicadas en los ensayos no fueron necesariamente las mismas. Lo que puede influir en la diferencia en magnitud de los resultados.

Simetrías de las constantes elásticas

Para verificar el requisito de simetría en la matriz de constantes elásticas del modelo elástico general, es necesario calcular la variación entre los términos no diagonales de la ecuación del modelo elástico general.

TABLA 2. Coeficientes de anisotropía de constantes de elasticidad.

Relaciones de anisotropía de las matrices de constantes elásticas					
S_{11} / S_{11}	S_{12} / S_{21}	S_{13} / S_{31}	-	-	-
-	S_{22} / S_{22}	S_{23} / S_{32}	-	-	-
-	-	S_{33} / S_{33}	-	-	-
-	-	-	S_{44} / S_{44}	-	-
-	-	-	-	S_{55} / S_{55}	-
-	-	-	-	-	S_{66} / S_{66}
Acer rubrum					
0	30,71	0,39	-	-	-
-	0	7,76	-	-	-
-	-	0	-	-	-
-	-	-	0	-	-
-	-	-	-	0	-
-	-	-	-	-	0
Abies balsamea					
0	12,88	25,21	-	-	-
-	0	12,98	-	-	-
-	-	0	-	-	-
-	-	-	0	-	-
-	-	-	-	0	-
-	-	-	-	-	0

La variación en la simetría de las matrices de constantes elásticas está expresada con los coeficientes de anisotropía propuestos por Bucur y Rasolofosaon (1998):

$$S_{ij} / S_{ji} = [(S_{ij} - S_{ji}) / S_{ij}] \times (100)$$

Las matrices de constantes elásticas presentadas en la tabla 2, fueron determinadas a partir de los resultados experimentales para *A. rubrum* y *A. balsamea*. Es importante hacer notar que los términos no diagonales de las matrices de constantes elásticas están compuestos de los módulos de elasticidad y de los coeficientes de Poisson

correspondientes al argumento de ortotropía del modelo elástico general.

De la observación de la tabla 2 se puede destacar que las variaciones para los tres componentes (S_{12} / S_{21} , S_{13} / S_{31} y S_{23} / S_{32}) de cada matriz son desiguales para cada especie. Es decir, existe una cierta tendencia en la amplitud de la variación al interior de cada grupo de valores analizados.

CONCLUSIONES

Se determinaron las características elásticas de las maderas de *A. rubrum* y de *A. balsamea*.

A partir de los resultados experimentales y del análisis comparativo con datos de otros estudios, se concluye lo siguiente: las características elásticas de *A. rubrum* y de *A. balsamea* son comparables con valores correspondientes de estas especies determinados en investigaciones recientes y con bases de datos publicados en la bibliografía.

El análisis de la variación de las características y de las constantes elásticas de la madera de *A. rubrum* y de *A. balsamea* demostró que los postulados de ortotropía del modelo elástico general son -con cierta precisión- válidos.

RECONOCIMIENTOS

La etapa experimental se realizó en el Centro de Ciencia y Tecnología de la Madera de la Facultad de Forestería y Manejo del Medio Ambiente, de la Universidad de New Brunswick, Canadá. Los trabajos de laboratorio fueron supervisados por los Profesores Ying Hei Chui y Meng Gong y por el Tecnólogo Dean McCarthy. La estancia de investigación del primer autor en Canadá fue patrocinada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México.

REFERENCIAS

ASTM (American Society for Testing and Materials International). 2009. D0143-94R07 Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. Annual Book of ASTM Standards. ASTM Volume 04.10 Wood. EUA.

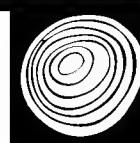
Barnett, J.R. y G. Jeronimidis. 2003. Wood quality and its biological basis. Blackwell Publishing. CRC Press. Inglaterra.

Bodig, J. y J.R. Goodman. 1973. Prediction of elastic parameters for wood. *Wood Science*. 5(4):249-264.

- Brown, H.P., A.J. Panshin y C.C. Forsaith. 1952. Textbook of wood technology. Volume II. McGraw-Hill. EUA.
- Bucur, V. y R.R. Archer. 1984. Elastic constants for wood by an ultrasonic method. *Wood Science and Technology*. 18:255-265.
- Bucur, V. y P.N.J. Rasolofosaon. 1998. Dynamic elastic anisotropy and nonlinearity in wood and rock. *Ultrasonics*. 36:813-824.
- Dinwoodie, J.M. 1981. Timber, its nature and behaviour. Van Nostrand-Reinhold. EUA.
- Gilman, E.F. y D.G. Watson. 1993. *A. Rubrum*. Red maple. Fact sheet ST-41. Environmental Horticulture Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. EUA.
- Forest Products Laboratory. 1999. Wood handbook-Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. USDA Forest Service. Forest Products Laboratory. Madison, Wi. 508 p.
- Forest Products Laboratory. 1953. Hardwood log grades for standard lumber. Rept. D1737. USDA Forest Service. Forest Products Laboratory. Madison, Wi. 66 p.
- Guitard, D. 1987. Mécanique du matériau bois et composites. Cepadues-Editions. Francia.
- Guitard, D. y F. El Amri. 1987. Modèles prévisionnels de comportement élastique tradimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux. *Annales des Sciences Forestières*. INRA 45(3):335-358.
- Haygreen, J.G. y J.L. Bowyer. 1996. Forest products and wood science, an introduction. Iowa State University Press. EUA.
- Hearmon, R.F.S. 1948. The elasticity of wood and plywood. Department of Scientific and Industrial Research. Forest Products Research. Special Report No. 7. His Majesty's Stationery Office. Inglaterra.
- Hernández-Maldonado, S.A. 2010. Comportamiento elástico de la madera. Teoría y aplicaciones. Tesis de Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Keunecke, D., S. Hering y P. Niems. 2008. Three-dimensional elastic behaviour of common yew and Norway spruce. *Wood Science and Technology* 42:633-647.
- Laghdir, A., Y. Fortin, C.M. De la Cruz y R.E. Hernández. 2008. Development of a technique to determine the 3D elasticity tensor of wood as applied to drying stress modeling. *Maderas. Ciencia y tecnología* 10(1):35-44.
- Lekhnitskii, S.G. 1963. Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body. Holden-Day. EUA.
- Lincoln, W.A. 1986. World woods in color. Linden Publishing. EUA.
- Liyu, W. y L. Zhenyou. 2004. Twelve elastic constants of *Betula platyphylla* Suk. *Forestry Studies in China* 6(1):37-41.
- Mackenzie-Helnwein, P., J. Eberhardsteiner y H.A. Mang. 2005. Rate-independent behavior of biaxially stressed Wood: Experimental observations and constitutive modeling as an orthotropic two-surface elasto-plastic material. *Holzforschung* 59:311-321.
- Mascia, N.T. 2003. Concerning the elastic orthotropic model applied to wood elastic properties. Modelo elástico ortotrópico aplicado a la madera. *Maderas. Ciencia y tecnología*. 5(1):3-19.
- Mascia, N.T. y F.A.R. Lahr. 2006. Remarks on orthotropic elastic models applied to wood. *Materials Research*. 9(3):301-310.
- Mattheck, C. y H. Kubler. 1997. Wood - The Internal Optimization of Trees. Springer-Verlag. Alemania.
- Miller, R.B. 1999. Characteristics and availability of commercially important woods. In: Forest Products Laboratory. Wood handbook—Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. USDA Forest Service. Forest Products Laboratory. Madison, Wi. p:2-2 a 2-45.
- Mullins, E.J. y T.S. McKnight. 1982. Third Edition. Canadian woods. Their properties and uses. University of Toronto Press. Canadian Forestry Service, Environment Canada. Canadian Government Publishing Centre, Supply and Services Canada.
- Niemz, P. y D. Caduff. 2008. Untersuchungen zur bestimmung der Poissonschen konstanten an fichtenholz. *European Journal of Wood and Wood Products* 66:1-4.
- Sliker, A. 1989. Measurement of the smaller Poisson's ratios and relates compliances for wood. *Wood and Fiber Science* 21(3):252-262.



- Sliker, A. y Y. Yu. 1993. Elastic constants for hardwoods measured from plate and tension tests. *Wood and Fiber Science* 25(1):8-22.
- Sliker, A.; Y. Yu, T. Weigel y W. Zangh 1994. Orthotropic elastic constants for eastern hardwood species. *Wood and Fiber Science* 26(1):107-121.
- Spelter, H. 2005. Red and silver maples – Resource availability, utilization, and costs. *In*: R.J. Ross y J.R. Erickson, eds. Undervalued hardwoods for engineering materials and components. Forest Products Society. Northern Initiatives. EUA.
- Tsoumis, G. 1991. Science and Technology of Wood. Structure, properties, utilization. Editorial Van Nostrand Reinhold. USA.
- Wodzicki, T.J. 2001. Natural factors affecting wood structure. *Wood Science and Technology* 35:5-26.
- Zerbe, J.I. 2005. Basic properties of undervalued hardwoods. *In*: R.J. Ross y J.R. Erickson, eds. Undervalued Hardwoods for Engineering Materials and Components. Forest Products Society. Northern Initiatives. EUA.
- Zink, A.G., R.B. Hanna y J.W. Stelmokas. 1997. Measurement of Poisson's ratios for yellow-poplar. *Forest Products Journal* 47(3):78-80.
- Manuscrito recibido el 18 de febrero de 2013.
Aceptado el 23 de mayo de 2014.
- Este documento se debe citar como:
Hernández-Maldonado, S.A. y J.R. Sotomayor-Castellanos. 2014. Comportamiento elástico de la madera de *Acer rubrum* y de *Abies balsamea*. *Madera y Bosques* 20(3):113-123.



Histoquímica, contenido de fenoles totales y actividad antioxidante de hoja y de madera de *Litsea glaucescens* Kunth (Lauraceae)

Histochemistry, total phenolic content and antioxidant activity in leaf and wood of *Litsea glaucescens* Kunth (Lauraceae)

Nery Alicia Tapia-Torres^{1,2}, Carmen de la Paz-Pérez-Olvera^{1*}, Angélica Román-Guerrero², Alejandra Quintanar-Isaías¹, Eristeo García-Márquez² y Francisco Cruz-Sosa²

¹ Departamento de Biología. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. México, D.F., México.

² Departamento de Biotecnología. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. México, D.F., México.

* Autor de correspondencia: cppo@xanum.uam.mx

RESUMEN

Litsea glaucescens (laurel) es una especie distribuida ampliamente en México, sus principales usos se centran en la medicina tradicional en forma de infusiones y baños medicinales para el alivio de desórdenes ginecológicos y estomacales. Esta propiedad terapéutica es atribuida a la presencia de compuestos fenólicos en el cuerpo de la planta. En el presente estudio se emplearon técnicas histoquímicas para localizar la presencia de compuestos fenólicos como lignina y taninos, así como lípidos y carbohidratos no estructurales en cortes de hoja y de madera; también se cuantificó el contenido de fenoles totales y la actividad antioxidante de extractos acuosos (92 °C y 25 °C) y metanólicos por los métodos de inhibición de los radicales DPPH y ABTS. Los resultados histoquímicos muestran que tanto las hojas como la madera poseen una concentración importante de compuestos fenólicos, aceites y algunos carbohidratos no estructurales. La caracterización química de los extractos acuosos de la hoja extraídos a 92 °C mostró una mayor concentración de fenoles totales que aquellos extraídos con metanol. En todos los casos, el contenido de fenoles fue mayor en las hojas que en la madera. Los extractos metanólicos obtenidos a partir de la albura mostraron mayor actividad antioxidante que los de duramen, sin importar el método de cuantificación empleado. De acuerdo con los resultados obtenidos, es posible establecer una interrelación entre el contenido y la distribución de los compuestos fenólicos en los tejidos vegetales y su actividad antioxidante con su uso potencial en la medicina tradicional.

PALABRAS CLAVE: cuerpos oleíferos, funcionalidad de extractos metanólicos, laurel silvestre, mesófilo, xilema secundario.

ABSTRACT

Litsea glaucescens is widely distributed in Mexico, its main uses are focused on traditional medicine in the form of teas and medicinal baths to relieve gynecological and stomach disorders. This therapeutic property is attributed to the presence of phenolic compounds through the plant body. In the present study, histochemical techniques were used to locate the presence of phenolic compounds like lignin and tannins, as well as lipids and non-structural carbohydrates in sections of leaves and wood and, to quantify total phenolic content and antioxidant activity by means of scavenging DPPH and ABTS free radicals on leaves and wood aqueous (92 °C and 25 °C) and methanolic extracts. Histochemical results show that leaves and wood displayed a considerable amount of phenolic compounds, oils and non-structural carbohydrates. Chemical characterization of leaves aqueous extracts made up at 92 °C displayed higher total phenolic content than those made with methanol. In all cases, the total phenolics were higher in leaves than in wood samples. Sapwood methanolic extracts showed higher antioxidant activity than heartwood, regardless the quantification method used. In agreement with these results, it is possible to establish an interrelationship between the content and distribution of phenolics on vegetal tissues and its antioxidant activity with its potential use for therapeutic end-uses.

KEY WORDS: oil bodies, methanolic extracts functionality, wild laurel, mesophyll, secondary xylem.

INTRODUCCIÓN

En México la familia Lauraceae tiene gran importancia en el área de la salud por sus aplicaciones en la etnomedicina y los alimentos. Se han identificado 10 taxa de esta familia: *Aiouea*, *Beilschmiedia*, *Cassytha*, *Cinnamomum*, *Licaria*, *Litsea*, *Mocinnodaphne*, *Nectandra*, *Ocotea* y *Persea*, distribuidas en bosques y selvas. Muchas especies de esta familia son utilizadas en medicina tradicional, forraje, aceites esenciales, condimentos y frutos (Lorea, 2002). El fruto de *Persea americana*, el aguacate, es el más comestible y el más conocido; los aceites esenciales que se extraen de él, poseen propiedades terapéuticas y son usados como componente en productos farmacéuticos por sus características físicas y químicas. Las hojas se utilizan en infusión como tónico digestivo y regulador de la menstruación (Jiménez *et al.*, 2001). La canela o corteza de *Cinnamomum verum*, por su aroma y sabor es utilizada como condimento, colorante y saborizante, por sus propiedades químicas, se usa en infusiones para el alivio de algunos desórdenes digestivos y ginecológicos. Las hojas de *Nectandra globosa* (aguacatillo) y *Litsea glaucescens* (laurel silvestre) se emplean como condimento y dado su alto porcentaje de proteína y fibra como forraje para ganado (Jiménez *et al.*, 2007).

L. glaucescens tiene asociado un uso medicinal desde tiempos ancestrales para el alivio de trastornos estomacales, problemas ginecológicos, o postparto, y para combatir la esterilidad femenina; asimismo se ha mencionado con propiedades antiinflamatorias (Argueta *et al.*, 1994, Biblioteca Digital de la Medicina Tradicional mexicana, 2014). La hoja de esta planta generalmente es empleada en forma de infusiones, macerados alcohólicos o inhalaciones de vapor (López *et al.*, 1995; Jiménez-Pérez *et al.*, 2011).

En el sistema agroforestal es usada como cercas vivas. La selección de las especies que constituyen esta práctica se da de acuerdo con la durabilidad natural de la madera y estrechamente relacionada con la densidad básica. Las principales ventajas que presenta esta selección son: reducción de la fuerza de los vientos, sombra para cultivos y para animales domésticos, forraje, control de malezas,

fuerza alternativa de frutos comestibles y leña (Araya *et al.*, 1993; Avendaño y Acosta, 2000). Para *L. glaucescens* la densidad básica se ha encontrado del orden de 0,60 (Torelli, 1982) por lo que se considera pesada y explica su importancia dentro de esta práctica agroforestal.

Esta especie se distribuye desde México hasta Centroamérica y el Norte de Sudamérica y puede encontrarse en regiones templadas (Lorea, 2002). En México, esta planta se distribuye en los estados de Aguascalientes, Chiapas, Durango, Estado de México, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Tamaulipas, Veracruz (Argueta *et al.*, 1994; Avendaño y Acosta, 2000; Luna, 2003; Jiménez *et al.*, 2007; Dávila *et al.*, 2009) y Quintana Roo.

Dada la importancia de esta planta, diversos estudios han publicado la identificación y aislamiento de compuestos químicos como: flavonoides, lignanos, proantocianidinas, alcaloides, aldehídos, terpenos, taninos, carbohidratos y fenoles presentes en extractos clorofórmicos e hidroalcohólicos, con la finalidad de evaluar las actividades antibacterianas, antifúngicas, antiinflamatorias, antiespasmódicas, y antioxidantes (Osuna *et al.*, 2005; Coy y Cuca 2007; Jiménez *et al.*, 2007; Macías, 2009; Macías, 2010; Jiménez-Pérez *et al.*, 2011). En este contexto, López *et al.* (1995) encontraron que los extractos etanólicos de la corteza de *L. glaucescens* son ricos en pinostrobin y pinocembrina, dos flavonoides con efecto terapéutico demostrado para el tratamiento de la dismenorrea. En este sentido Cáceres *et al.* (1987; 1991) observaron que el uso de extractos acuosos y etanólicos de la hoja de *L. guatemalensis* promovía la inhibición del crecimiento *in vitro* contra diversos microorganismos patógenos como *Epidermophyton floccosum* (Harz) Langeron & Miloch., *Microsporum canis* E. Bodin ex. Gueg y *Candida albicans* (Robin) Berkhout. También observaron que los extractos metanólicos de tallos, hojas, frutos y semillas de *L. neesiana* y *L. glaucescens* mostraron actividad moderada contra *Staphylococcus aureus* Rosenbach y *Escherichia coli* Migula (Meckes *et al.*, 1995). Por otra parte, Tucker *et al.* (1992) indicaron la presencia de linalool y cineol en el aceite esencial extraído de hojas de *L. glauces-*



cens y *L. guatemalensis* Mez., a los que se les atribuyen propiedades bactericidas y fungicidas.

Cabe resaltar que la presencia de estos componentes está asociada con el crecimiento natural de la planta y conforman parte de las estrategias de defensa contra patógenos y predadores cuando hay daño o infección (Evert, 2006; Yan *et al.*, 2000; Guzmán-Gutiérrez *et al.*, 2012). Dadas las características químicas de estos compuestos, su actividad antioxidante se debe principalmente a las propiedades redox que les permite funcionar como agentes reductores, donadores de hidrógeno, quelantes e inhibidores de especies reactivas de oxígeno (Rice-Evans *et al.*, 1995).

OBJETIVOS

Determinar y localizar cualitativamente mediante técnicas histoquímicas, la presencia de compuestos fenólicos como lignina y taninos, así como lípidos y carbohidratos no estructurales en hojas frescas, tratadas como té tradicional, hervidas a 92 °C y en infusión alcohólica, así como en secciones frescas de la madera de *Litsea glaucescens*. Asimismo evaluar las propiedades funcionales de los extractos acuosos y metanólicos mediante la cuantificación de la concentración de fenoles totales y su interrelación con la actividad antioxidante *in vitro*.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material biológico utilizado se obtuvo de un árbol de 10 m de altura, con fuste de 5 m y diámetro de 24 cm. El ejemplar se recolectó en una selva mediana subperennifolia en el municipio y ejido Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo. Santos *et al.* (1998), mencionan que este tipo de vegetación es la dominante. El ejido se localiza entre los paralelos 19° 34' 43" de latitud Norte y en los meridianos 88° 02' 43" de longitud Oeste, tiene una altitud de 30 m snm, el clima es Aw₀, Aw₁ y Aw₂ caracterizado como cálido subhúmedo con una temperatura promedio de 25 °C y una precipitación anual de 800 a 1000 (INEGI, 2010).

El ejemplar de herbario, se identificó y registró en el Herbario Metropolitano UAMIZ Dr. Ramón Riba y Nava con el número 67133 y las muestras de madera en la Xiloteca UAMI con la clave M-279.

Preparación del material vegetal

Del árbol seleccionado se recolectaron de forma aleatoria cinco kilogramos de hojas y de su fuste, a una altura de 1,30 m (DAP) se cortaron dos rodajas, una de 8 cm y otra de 5 cm de alto.

Hoja. Para los estudios histoquímicos de detección y localización de lignina, taninos, lípidos (aceites y ceras) y carbohidratos no estructurales (granos de almidón y pectinas) se seleccionaron 20 hojas. Se elaboraron secciones transversales de la zona media de la lámina de la hoja con un criostato marca Leica a -20 °C. La descripción de los tejidos que conforman este órgano se realizó de acuerdo con Evert (2006). Para la determinación cuantitativa de fenoles totales y actividad antioxidante se utilizaron las hojas restantes. Estas se dejaron secar dentro de una estufa a una temperatura de 30 °C y en oscuridad durante 15 días, posteriormente se molieron y se tamizaron a un tamaño de partícula no mayor a 250 µm de acuerdo con Serrano (2010).

Madera. De la rodaja de 8 cm se obtuvieron cubos de 1 cm x 1 cm, tanto de la albura como del duramen. Se obtuvieron secciones transversales, tangenciales y radiales mojando las superficies. A mano alzada se hicieron los cortes empleando navajas de un filo para criostato. En estas se hicieron las pruebas de detección y localización histoquímica de lignina, taninos, lípidos, almidones u otros carbohidratos no estructurales. Se analizaron las paredes y contenidos celulares en fibras, vasos y parénquima axial y radial de albura y duramen.

Para la determinación de los fenoles totales y la actividad antioxidante se utilizó la pieza de 5 cm de la que se separó la albura y el duramen. De cada zona se obtuvieron muestras de aserrín y se consideraron dos categorías de muestras experimentales: de la albura y el duramen. Todas las muestras se tamizaron para obtener partículas no mayores a 250 µm.

Determinación cualitativa de compuestos fenólicos, lípidos totales y carbohidratos no estructurales.

En los cortes de las hojas y la madera se detectó la lignina (color rojo) empleando el reactivo de Wiesner (fluorogluci-

nol al 2% en etanol al 96%) por cinco minutos en secciones frescas y montando con una gota de HCl 6N (Rivera *et al.*, 1999). También se usó el reactivo de Mañile (solución acuosa de permanganato de potasio al 1%) por cinco minutos en secciones frescas. Estas se lavaron con agua destilada y cubrieron con una solución de HCl al 30% y se montaron con una gota de hidróxido de amonio concentrado (color fucsia) (Vallet *et al.*, 1996).

Para la detección y localización de los taninos, se empleó la técnica de vainillina-HCl (solución saturada de vainillina en etanol al 95%), se cubrieron secciones frescas durante 5 minutos y montando con una gota de HCl 9N (naranja rojizo) (Rivera *et al.*, 1999).

Adicionalmente se empleó Azul de toluidina para contrastar lignina y polifenoles (verde turquesa), carbohidratos (color lila) y aceites (sin color).

Asimismo se empleó Lugol para contrastar lignina (amarillo) de carbohidratos no estructurales (morado azulado) (Rivera *et al.*, 1999).

Se empleó Sudán negro para detectar lípidos totales (ceras y aceites) en paredes celulares o como depósitos (color negro) (Krishnamurthy, 1988). Adicionalmente se hicieron cortes transversales de hojas enteras después de ser tratadas en agua (25 °C y 92 °C) y metanol. En estos cortes se utilizó vainillina y Sudán IV para evaluar la pérdida de compuestos fenólicos solubles en agua y/o presencia de cuerpos oleíferos en el mesófilo de la hoja después de cada tratamiento (Lersten *et al.*, 2006). Los resultados se compararon con cortes de hojas frescas teñidas bajo el mismo procedimiento.

En el estudio histoquímico en hoja y madera se usaron al menos diez secciones para cada tinción.

Preparación de los extractos de *L. glaucescens*

Para la cuantificación de fenoles totales y la actividad antioxidante se hicieron tres extractos utilizando como solventes agua en ebullición, agua destilada a 25 °C y metanol, con la finalidad de determinar las mejores condiciones de extracción de compuestos fenólicos en hojas y madera (albura y duramen) de *L. glaucescens*. El primero se preparó de acuerdo con Serrano (2010). A 500 mg de muestra

de hoja y de madera se les añadieron 25 mL de agua destilada y se mantuvieron en agitación durante 5 min a una temperatura de 92 °C. El extracto obtenido se filtró y aforó a 25 mL con agua destilada. Este extracto es similar al tradicional té que se prepara con *L. glaucescens*. Los otros dos extractos se prepararon siguiendo la metodología propuesta por Miliauskas *et al.* (2004). A 500 mg de cada muestra de hoja y de madera, se les añadieron 10 mL de agua destilada o metanol, se mantuvieron en agitación durante 30 min a una temperatura de 25 °C, se filtraron y aforaron a 10 mL con el solvente correspondiente.

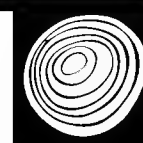
Cuantificación de la concentración de fenoles totales (CFT)

La concentración de fenoles totales en los tres extractos de hojas y de madera se midió con un espectrofotómetro UV-VIS Spectronic GENESYS 2, usando el reactivo Folin-Ciocalteu. El contenido de fenoles totales se cuantificó mediante el siguiente procedimiento: a una mezcla de reacción que contiene 1,58 mL de agua desionizada, 20 µL de la solución estándar de ácido gálico o 20 µL de la disolución problema (por triplicado) o 20 µL de agua desionizada si era el blanco, se le agregaron 100 µL del reactivo de Folin-Ciocalteu (50% v/v). Después de agitar en un vortex se dejó incubar durante 8 minutos y finalmente se añadieron 300 µL de solución de carbonato de sodio (Na₂CO₃) al 20% (p/v). Esta última se incubó durante 30 min a 40 °C. Después se obtuvo la lectura de la absorbancia a una longitud de onda de 765 nm. La solución estándar utilizada fue ácido gálico de 500 mg/mL, de la cual se tomaron alícuotas de 0,625 mg/mL; 1,25 mg/mL; 2,5 mg/mL; 5 mg/mL y 10 mg/mL. El contenido de la muestra se expresó como mg de equivalentes de ácido gálico por gramo de sólido seco ($\text{mg}_{\text{EAG}}/\text{mL}_{\text{sólido seco}}$) (Singleton y Rossi, 1965).

Actividad antioxidante

Inhibición del radical 2,2-difenol-1-picrilhidrazil (DPPH)

La actividad antioxidante se determinó con el método DPPH• en una cinética realizada a la disolución del radical



se obtuvo un máximo de absorbancia de 516 nm. La evaluación de la actividad antioxidante por la reducción del radical DPPH se realizó de acuerdo con Sánchez-Moreno *et al.* (1998), la mezcla de reacción se obtuvo colocando en un tubo de ensayo 1,5 mL de DPPH y 20 mL de la solución estándar trolox o 20 μ L de la disolución problema (por triplicado) o 20 μ L de agua desionizada si era el blanco. Se dejó reaccionar durante 30 min a temperatura ambiente y en oscuridad. Se determinaron las lecturas de absorbancia a 765 nm. La reducción del radical se determinó mediante el cálculo de la concentración en equivalentes a la actividad antioxidante (TEAC) por medio de una curva de calibración realizada con trolox a 500 μ M. Las concentraciones utilizadas que se tomaron fueron 50 μ M, 100 μ M, 150 μ M, 200 μ M y 250 μ M.

Inhibición del radical ácido 2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico) (ABTS).

La evaluación de la actividad antioxidante por el método ABTS se realizó empleando el ensayo modificado de Ozgen *et al.* (2006), que se basa en la utilización del compuesto ABTS para la formación de un radical libre ABTS^{•+} tras la reacción química de ABTS (3,7 mM) y persulfato potásico (1,3 mM) cuyo tiempo de reacción va de 12 h a 16 h. En una cinética realizada a la disolución del radical con el buffer se obtuvo un máximo de absorbancia de 728 nm. Para evaluar la actividad antioxidante por el método ABTS se realizó la mezcla de reacción colocando 1,5 mL de ABTS y 10 mL de la solución estándar trolox o 10 μ L de la disolución problema (por triplicado) o 10 μ L de agua desionizada para el blanco. Se dejó reaccionar durante 30 minutos a 38 °C. Se tomó la lectura de absorbancia. Los datos se expresaron como equivalentes de Trolox (TEAC, mM). Para la preparación de la curva estándar se tomaron alícuotas de 50 μ M, 100 μ M, 200 μ M, 300 μ M, 400 μ M y 500 μ M de la solución de trolox a 1000 μ M.

Análisis estadístico

Todas las determinaciones fueron realizadas por triplicado. Los resultados obtenidos se analizaron con la prueba estadística de comparación múltiple de medias de

Tukey de significancia $p \leq 0,05$ con el software IBM SPSS Statistics V 17.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características histoquímicas de la hoja.

Las hojas de *Litsea glaucescens* son bifaciadas con dos estratos de parénquima en empalizada; los espacios intercelulares en el mesófilo son muy reducidos (Figs. 1A, D, G, E, G y H); la cutícula y las paredes de las células epidérmicas son gruesas y estas últimas con contenido de origen fenólico en las cavidades (Figs. 1D y F); presenta pelos como derivados epidérmicos. Los tratamientos de las hojas como infusión a temperatura ambiente y en ebullición mostraron que los fenoles presentes en la epidermis se van perdiendo después del tratamiento (Figs. 1C y G, 2A-B).

Las paredes de las fibras marginales, las perivasculares, las del xilema y las de los vasos de los haces vasculares primarios de la lámina y del leñoso de la nervadura central, presentan lignificación (Figs. 1A-E). Se identificó un tipo de fenol (reactivo de Mañle) en la pared celular de las fibras perivasculares y marginales de toda la hoja, que Esau (1972) destaca como un compuesto asociado a favorecer una mejor conducción de agua (Fig. 1B). La intensidad registrada para los fenoles en las hojas frescas disminuyó en aquellas tratadas como té y en ebullición (Figs. 2A-B).

En general en las cavidades de las células que dan soporte mecánico y conducción en toda la hoja y las del colénquima anular de la nervadura se identificaron depósitos fenólicos y taninos (Figs 1B-D y F). En el colénquima se presentaron depósitos de aceites y granos de almidón (Figs. 1F y 2D).

Se confirmó la presencia de ceras en la cutícula, aceites en las cavidades de la epidermis y cuerpos oleíferos dentro de las células del parénquima en empalizada (Fig. 2F) y en células oleíferas similares a las que describe Lersten *et al.* (2006) (Figs. 1D, F, H y 2C y E), las que se distribuyen en toda la hoja (Figs. 1B-F y H). Se observaron dos tipos de células oleíferas en el mesófilo: el tipo A localizado entre el parénquima en empalizada (Figs. 1H y 2C

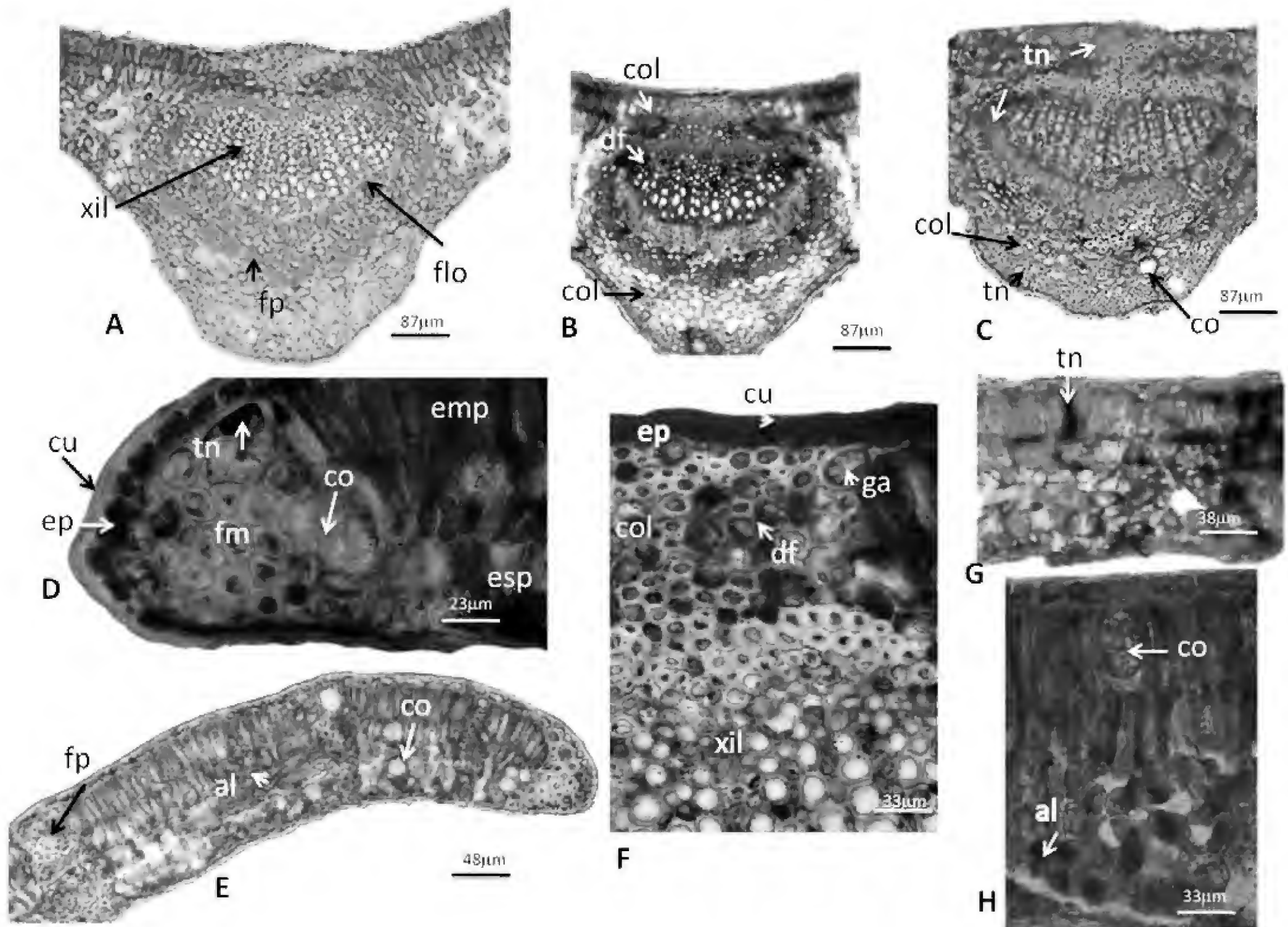


FIGURA 1. Características histoquímicas de la hoja. Nervadura central: A-C y F. Lignificación en fibras perivasculares (fp): A, reactivo de Wiesner. B, reactivo de Mäule, colénquima (col) sin teñir. C, taninos (tn) con vainillina en colénquima y floema. F, cuerpos oleíferos (ga), de fenoles (df) y células oleíferas (co) en colénquima (col), epidermis (ep); ceras en la cutícula (cu) con sudán negro. Lámina de la hoja: D, E, G y H, D, margen de la hoja: fibras marginales (fm), cutícula (cu), contenidos fenólicos en epidermis (ep), células oleíferas (co), parénquima en empalizada (emp) y esponjoso (esp) con azul de toluidina. E y H, distribución y detalle de células oleíferas (co); granos de almidón (al) con lugol. G, taninos (tn) en parénquima en empalizada y esponjoso con vainillina. xil: xilema; flo: floema.

y F), conteniendo muchos cuerpos oleíferos, y el tipo B, entre el parénquima esponjoso de la cara abaxial (Figs. 2A y B), presentando un cuerpo oleífero de gran tamaño. Las hojas tratadas por infusión a 25 °C y a 92 °C mostraron pérdida de cutina (Figs. 2C-F), comparando la intensidad de la tinción de la reacción en los distintos tratamientos. Destacan los resultados en el tratamiento con extracción alcohólica, en la que las células de la epidermis muestran

menor intensidad. Por otro lado se observó que los cuerpos oleíferos contenidos en ambos tipos celulares, A y B, se contraen con los tratamientos, incluso con el alcohólico (Figs. 1H, 2A-C, 2E y F).

Adicionalmente se localizaron taninos en las paredes de las fibras del floema y en las células del parénquima en empalizada, principalmente en el primer estrato adaxial y en algunas células del esponjoso (Figs. 1C y G). En las



hojas empleadas para la infusión a 25 °C y mayormente para aquellas tratadas a 92 °C, se observó una clara disminución en la intensidad de la tinción (Figs. 2A-B).

Cuantificación de la concentración de fenoles totales y actividad antioxidante en la hoja

En términos generales, la extracción acuosa de compuestos fenólicos empleando altas temperaturas y solventes polares, mejoró significativamente la concentración de fenoles totales (Tabla 1), lo anterior se debe principalmente al número de grupos -OH presentes en los compuestos fenólicos que favorecen su solubilidad en agua y por lo tanto su extracción (Vermerris y Nicholson, 2008), Se ha mencionado que los fenoles al tener más de un grupo -OH cooperan en la solubilidad en agua, además la temperatura juega un papel muy importante en la extracción de dichos compuestos, lo anterior se debe a que ésta favorece el incremento en los coeficientes de difusión y solubilidad de los compuestos fenólicos, al promover la liberación de los polifenoles debido al rompimiento de ciertas estructuras celulares (Wang *et al.*, 2007; Al-Farsi y Lee, 2008).

Los resultados de esta extracción y la presencia de diversos compuestos como taninos, fenoles y aceites en células especializadas en toda la hoja son significativos pues sugiere la razón de la preparación tradicional de infusiones y baños calientes para el alivio a problemas estomacales, ginecológicos y antiinflamatorios (Argueta *et al.*, 1994). Adicionalmente Campagna *et al.* (2012) reportan propiedades antidiarreicas y antisépticas asociándolas a fenoles, lo que representa el papel preponderante del conocimiento tradicional en el tratamiento de este tipo de trastornos. Asimismo la hoja mostró una concentración de fenoles totales significativamente mayor ($p < 0,05$) cuando se empleó agua a 92 °C respecto al tratamiento a 25 °C (Tabla 1). Cabe mencionar que los extractos metanólicos de las hojas presentaron la menor cantidad de compuestos fenólicos, lo que está relacionado con la forma y uso en que tradicionalmente se administra la hoja. Por otra parte, para ambas pruebas de inhibición de los radicales DPPH y ABTS, los extractos metanólicos y

acuosos a 92 °C presentaron mayor actividad antioxidante que aquellos cuya infusión se llevó a cabo a 25 °C.

De los resultados anteriores resalta que, dependiendo de la forma de la extracción, puede ser el tipo y tiempo del tratamiento en la práctica tradicional.

Características histoquímicas de la madera

La madera presenta diferencias entre albura y duramen. La primera ocupa de 52% a 55% y el duramen de 45% a 48% del área total del tronco. Los vasos, las fibras y ambos tipos de parénquima presentan paredes muy gruesas con contenidos celulares que varían en composición de albura a duramen. Los radios presentan células oleíferas características de la familia Lauraceae.

La albura exhibió un mayor contenido de compuestos de origen lipídico en tálides, en algunas fibras y en las cavidades de algunas células del parénquima axial y radial (Figs. 3E-I).

El duramen muestra algunos contenidos de las células de los radios no asociados a fenólicos (Figs. 3E y J), sino a aceites que en la albura se observan como carbohidratos no estructurales (Figs. 3 H-I).

La albura presentó reacción a la lignina destacando las unidades de guayacil procedentes de un solo monolignol y para el duramen las de siringil que se forman a partir de dos o tres monolignoles (Vermerris y Nicholson, 2008). En relación con los taninos y depósitos fenólicos, la albura presenta este tipo de componentes en algunas células del parénquima axial y radial (Figs. 3A y B), mientras que en el duramen estos compuestos se han depositado en las paredes de todos los tipos celulares (Figs. 3C-E y J). La presencia de este tipo de compuestos fenólicos en todos los elementos celulares del duramen influye en la diferencia de color con respecto a la albura y de acuerdo con Rivera *et al.* (1999) e Isaza (2007) estos fenoles proporcionan un sistema de defensa ante el ataque de microorganismos (bacterias y virus), insectos y hongos. Lo anterior es una de las razones, de que el duramen en general tiene mayor durabilidad natural que la albura, lo que también está relacionado con la presencia de aceites esenciales (Figs. 3E-J). Los carbohidratos no estructurales, lípidos y depó-

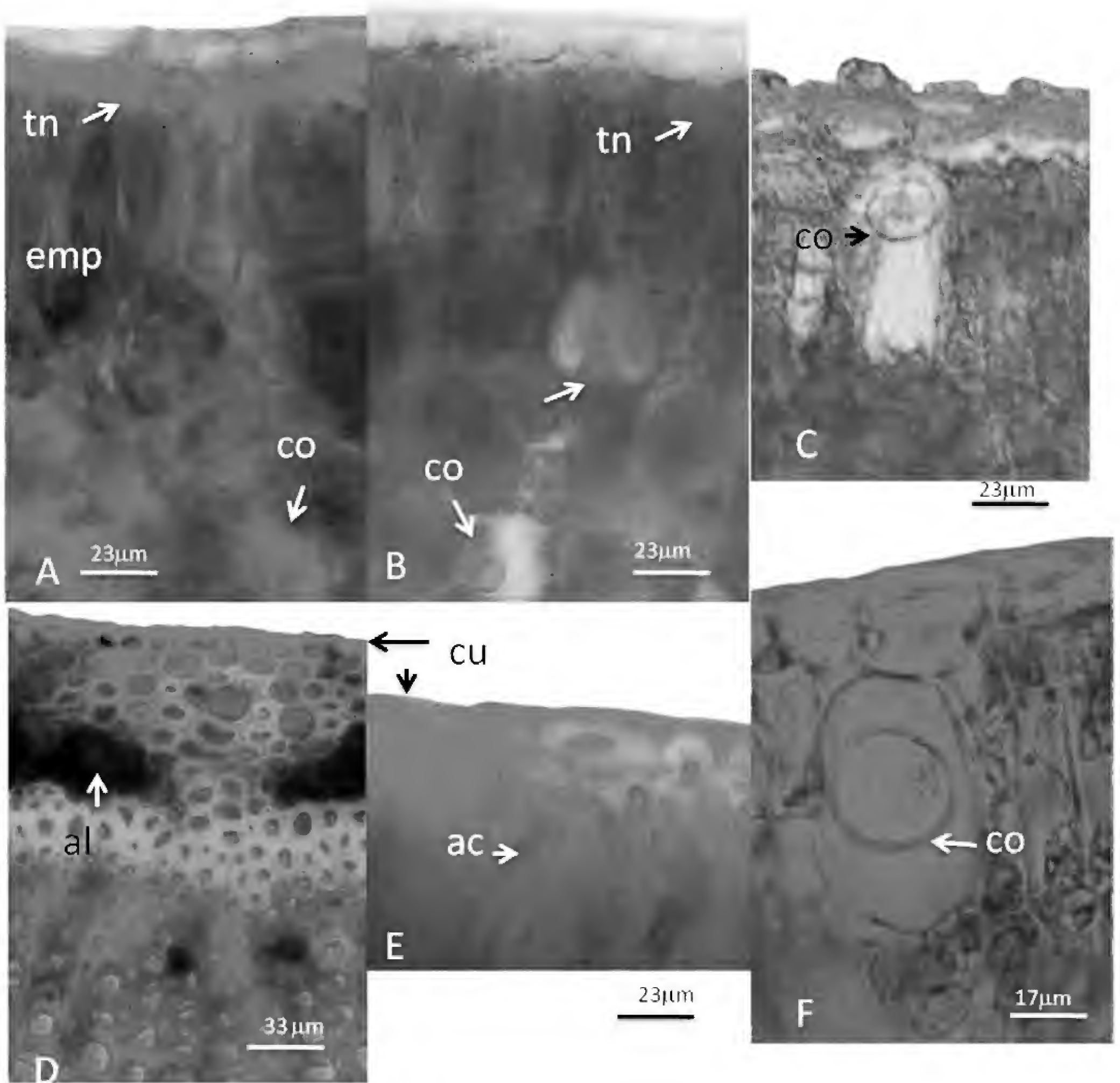


FIGURA 2. Características histoquímicas de la hoja. A. Lámina de la hoja en fresco (vainillina) y B. Lámina de la hoja hervida a 92° C. (vainillina), células oleíferas tipo B. C-F. Sudán IV. C. Lámina de la hoja, hervida a 92 °C. E. Sección de la lámina de la hoja del té y F. Lámina de la hoja del extracto, células oleíferas tipo A, *cuerpo oleífero. D. Nervadura central. Doble tinción con Sudán IV y Lugol, granos de almidón (ga). Células oleíferas (co), aceites (ac), parénquima en empalizada (emp), cutícula (cu), taninos (tn).

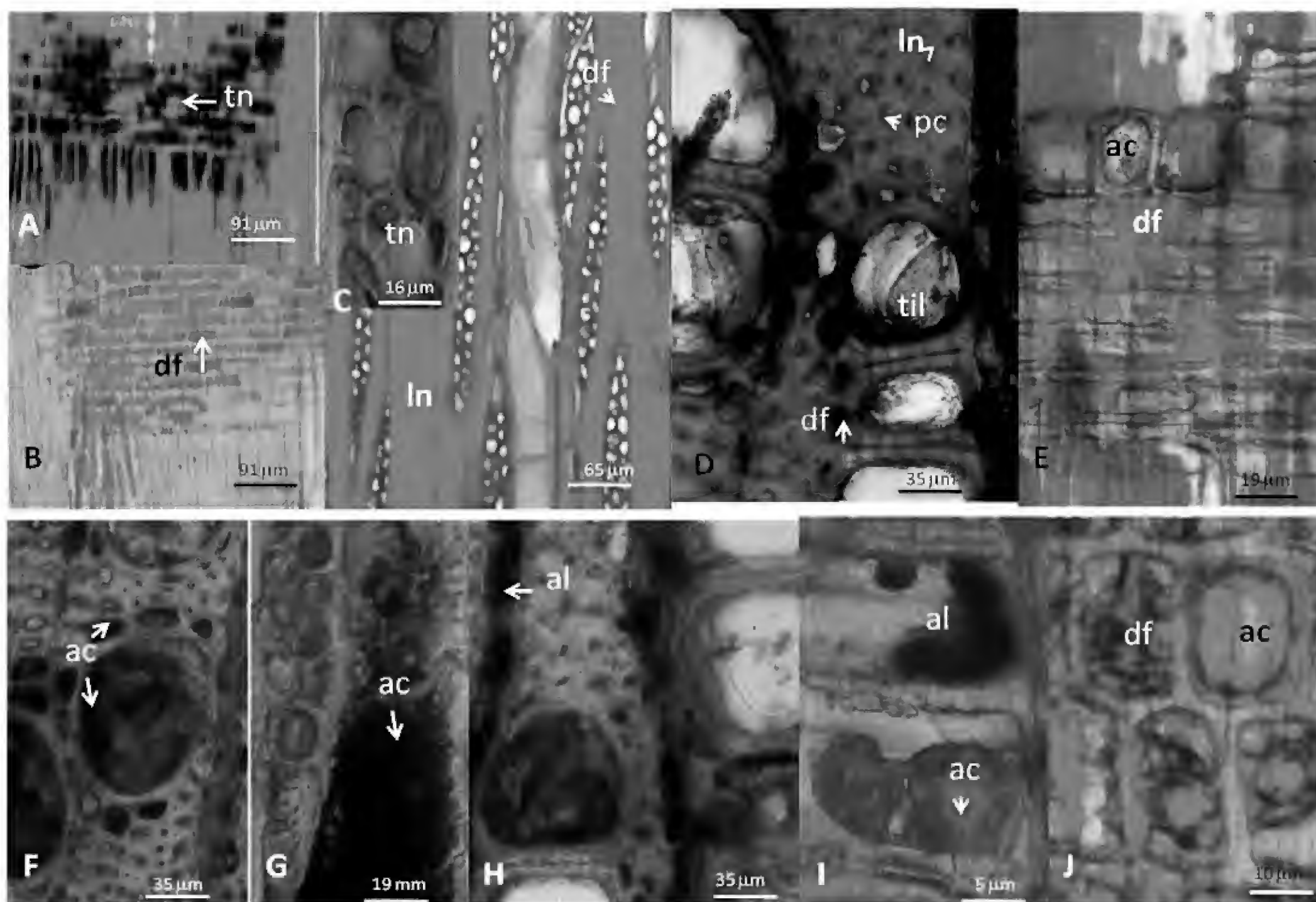


FIGURA 3. Características histoquímicas la madera. A-C. Taninos (tn) en albura: A, vainillina. B, reactivo de Mäule. C, lignina (ln), depósitos fenólico (df) y taninos (tn) en fibras, vasos y paredes de radios en duramen, reactivo de Wiesner. D, lignina (ln) en paredes de fibras y vasos, depósitos fenólicos (df) en cavidades y pectinas (pc) en paredes internas de fibras y en paredes primarias de tílides (til), azul de toluidina. E, depósitos fenólicos (df) y aceites en células de radio (ac) azul de toluidina. F y G, depósitos de aceites (ac) en tílides, sudán negro. H-I, granos de almidón (al) con lugol. I y J. aceites y depósitos fenólicos (df) en células de radio.

sitos fenólicos presentes en albura, zona de transición y duramen contribuyen a comprender el proceso de duraminización en esta especie.

Cuantificación de la concentración de fenoles totales y actividad antioxidante de la madera

En lo que respecta a la madera de *L. glaucescens*, la concentración de fenoles totales fue más alta en la albura con extracción metanólica (Tabla 1), aunque destaca que del duramen se puede extraer el mayor contenido de fenoles

totales por ebullición a 92 °C. En relación con la actividad antioxidante se puede observar que la albura mostró la mayor actividad antioxidante para los extractos metanólicos seguida del tratamiento acuoso a 92 °C y finalmente la infusión a 25 °C (Tabla 1). Las diferencias observadas entre el contenido de compuestos fenólicos y la actividad antioxidante en los diferentes tratamientos es debido a la naturaleza química de los solventes, radicales y polaridad de los compuestos fenólicos, de manera que la combinación de estas propiedades conlleva a cambios en la trans-

TABLA 1. Fenoles totales y actividad antioxidante de extractos de hoja y madera *Litsea glaucescens*.

Tratamiento	CFT	DPPH	ABTS
	[mg _{EAG} /g _{sólidos secos}]	TEAC [μM]	TEAC [μM]
(Eb _{Ho})	414,3 ± 7,1^a	541,0 ± 38,2 ^e	198,8 ± 13,2 ^g
(Eb _{Al})	267,5 ± 6,3 ^e	838,6 ± 12,6^b	142,3 ± 13,6 ^h
(Eb _{Du})	331,7 ± 2,0	531,0 ± 23,9 ^e	320,4 ± 24,0^{d,e}
(A _{Ho})	157,1 ± 0,7^g	449,5 ± 36,7 ^f	159,4 ± 1,4 ^{g,h}
(A _{Al})	146,0 ± 6,8 ^{g,h}	737,9 ± 24,9^c	274,4 ± 14,1 ^{e,f}
(A _{Du})	120,2 ± 2,9 ⁱ	498,4 ± 29,8 ^{e,f}	355,1 ± 1,9^{c,d}
(Met _{Ho})	142,3 ± 0,7 ^h	556,2 ± 7,9 ^e	266,3 ± 4,0 ^f
(Met _{Al})	371,1 ± 5,8^b	952,6 ± 212,0^a	545,5 ± 14,9 ^b
(Met _{Du})	268,4 ± 6,9 ^e	834,5 ± 7,3 ^b	705,0 ± 7,9^a

CFT. Fenoles totales. DPPH y ABTS: ensayo de capacidad antioxidante. TEAC: Equivalentes de Trolox. Eb: ebullición; A: agua 25°C; Met: metanol. Ho: hoja; Al: albura; Du: duramen. Valores con letra distinta: significativamente distintos. Valores en negritas: resultados relevantes.

ferencia de electrones y de átomos de hidrógeno, así como la presencia de algunos compuestos sin actividad antioxidante que pueden interferir en la determinación, como los compuestos fenólicos polimerizados (Pérez-Jiménez y Saura-Calixto, 2006).

A pesar de que la actividad antioxidante en los extractos acuosos a 92 °C no fue la mayor, la importancia de su determinación reside en su aplicación terapéutica en la medicina tradicional.

Los estudios realizados por López *et al.* (1995), Osuna *et al.* (2005) y Macías (2010) indican la relevancia que tienen los fenoles como lignanos y taninos al comprobar su actividad terapéutica por sus propiedades antibacterianas, antifúngicas, antiespasmódicas, antitumorales, hormonales, antimicrobianas y como inhibitoria a la replicación del HIV-1 que es el retrovirus que causa el SIDA.

Cabe mencionar que, a pesar de que existen algunos estudios que dan indicio de la composición de ciertos extractos de *L. glaucescens*, la mayoría de los compuestos encontrados poseen baja hidrofiliidad debido a que fueron caracterizados a partir de los aceites esenciales de esta planta y extraídos bajo condiciones prolongadas de tiempo y altas temperaturas, como es el caso de la hidrodestilación (Guzmán-Gutiérrez *et al.* 2012), por consiguiente la

presencia de los compuestos terpenoides encontrados bajo las condiciones de extracción probadas en el presente trabajo es casi nula. Además es bien sabido que la exposición de compuestos fenólicos a altas temperaturas por tiempos largos ocasiona la pérdida de los mismos debido a su alta inestabilidad térmica (Liyana-Pathirana y Shahidi, 2005).

Es relevante destacar que la cantidad de compuestos fenólicos con actividad antioxidante extraídos a partir de cualquiera de las tres condiciones probadas en el presente trabajo no contempla su identificación, sino la interrelación de su ubicación en los tejidos vegetales y su uso para definir su funcionalidad con su uso potencial en la medicina tradicional.

Adicionalmente, a pesar de que los extractos metanólicos en madera presentaron mayor actividad antioxidante, el uso de los extractos acuosos justifica la funcionalidad antioxidante sin representar riesgos a la salud en el uso tradicional, resaltando la actividad antioxidante de la albura de la cual aún no existe un registro satisfactorio de su uso.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se demuestra la presencia de compuestos fenólicos como lig-



nanos y taninos, así como la presencia de aceites y almidones en la hoja y la madera de *Litsea glaucescens*. Desde el punto de vista químico, se encontró que es posible definir una relación entre la concentración de compuestos fenólicos y su localización en los tejidos vegetales, así como la funcionalidad tanto en la planta como en los extractos comúnmente utilizados en la medicina tradicional, justificando su gran potencial para el uso terapéutico.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen a los ejidatarios de Felipe Carrillo Puerto, las facilidades brindadas para la recolección del material de estudio y a la M. en B. Ana Teresa Jaramillo por su apoyo en el procesamiento de fotografías y la revisión del texto. Este estudio fue financiado por la Universidad Autónoma Metropolitana.

REFERENCIAS

- Al-Farsi, M.A. y C.Y. Lee. 2008. Optimization of phenolics and dietary fibre extraction from date seeds. *Food Chemistry* 108:977-985.
- Araya, J., J.E. Benavides, R. Arias y A. Ruiz. 1993. Identificación y caracterización de árboles y arbustos con potencial forrajero en Puriscal, Costa Rica. 31-63. Seminario Centroamericano y del Caribe Sobre Agroforestería y Rumiantes Menores. Costa Rica. Comisión Nacional Para el Desarrollo de la Actividad Caprina.
- Argueta, A., L. Cano y M. Rodarte. 1994. Atlas de las plantas de la medicina tradicional mexicana. 3:883-884. Instituto Nacional Indigenista, México, D.F.
- Avendaño, S. e I. Acosta. 2000. Plantas utilizadas como cercas vivas en el estado de Veracruz. *Madera y Bosques* 6(1): 55-71.
- Biblioteca Digital de la Medicina Tradicional Mexicana, 2014. *Litsea glaucescens*. Laurel silvestre. Página electrónica UNAM. <http://www.medicinatradicionalmexicana.unam.mx/>
- Cáceres, A., L.M. Girón, S.R. Alvarado, y M.F. Torres. 1987. Screening of antimicrobial activity of plants popularly used in Guatemala for the treatment of dermatomucosal diseases. *Journal of Ethnopharmacology* 20(3):223-237.
- Cáceres, A., B.R. López, M.A. Girón y H. Logemann. 1991. Plants used in Guatemala for the treatment of dermatophytic infections. 1. Screening for antimycotic activity of 44 plant extracts. *Journal of Ethnopharmacology* 31(3):263-276.
- Campagna, M., M. Martínez, A. Broussalis y M. Gattuso. 2012. Actividad antioxidante, análisis fitoquímico y micrografía analítica de hojas de *Castela tweedii* (Simaroubaceae). Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas 11:498-509.
- Coy, E. y L. Cuca. 2007. Metabolitos con actividad biológica aislados de especies pertenecientes a la familia Lauraceae. *Scientia et Technica* XIII(33):363-364.
- Dávila, C.A., F. Flores, J. Morales, R. Clark y E. Molphe. 2009. Abundancia y explotación del laurel silvestre *Litsea glaucescens* Kunth en Aguascalientes, México. III Simposio Nacional de Ecología: Manejo y Conservación de los Ecosistemas de Montaña en México.
- Esau, K. 1972. Anatomía vegetal. Omega. 779p.
- Evert, R. F. 2006. Esau Anatomía vegetal. Meristemas, células y tejidos de las plantas: su estructura, función y desarrollo. 3ed. Omega. 614p.
- Guzmán-Gutiérrez, S.L., R. Gómez-Cancino, J.C. García-Zebadúa, N.C. Jiménez-Pérez y R. Reyes-Chilpa. 2012. Antidepressant activity of *Litsea glaucescens* essential oil: Identification of b-pinene and linalool as active principles. *Journal of Ethnopharmacology* 143(2):673-679.
- INEGI. 2010. Censo de población y vivienda. Quintana Roo. INEGI. Fecha de consulta 08 de marzo del 2012. <http://www3.inegi.org.mx>.
- Isaza, J.H. 2007. Taninos o polifenoles vegetales. *Scientia et Technica* XIII(33):13-18.
- Jiménez, G., H. Pérez, L. Soto, J. Nahed, L. Hernández y J. Carmona. 2007. Livestock, nutritive value and local knowledge of fodder tree in fragment landscapes in Chiapas, Mexico. *Interciencia* 32(4):274-280.
- Jiménez, M.E., M.R. Aguilar, M.L. Zambrano y E. Kolar. 2001. Propiedades físicas y químicas del aceite de aguacate obtenido de puré deshidratado por microondas. *Revista de la Sociedad Química de México* 25(2):89-92.

- Jiménez-Pérez, N.C., F.C. Lorea-Hernández, C.K. Jankowski y R. Reyes-Chilpa. 2011. Essential oils in Mexican bays (*Litsea* spp., Lauraceae): taxonomic assortment and ethnobotanical implications. *Economic Botany* 65(2):178-189.
- Krishnamurthy, K. V. 1988. Methods in plant histochemistry. S. Viswanathan. India. 90 p.
- Liyana-Pathirana, C. y F. Shahidi. 2005. Optimization of extraction of phenolic compounds from wheat using response surface methodology. *Food Chemistry* 93(1):47-56.
- Lersten, N.R., A.R. Czapinski, J.D. Curtis, R. Freckmann y H.T. Horner. 2006. Oil bodies in leaf mesophyll cells of angiosperms: overview and selected survey. *American Journal of Botany* 93(12):1731-1739.
- López, J., W. Barillas, J. Gómez, F. Lin, A. Al, M. Sharaf y P. Schiff. 1995. Flavonoids of *Litsea glaucescens*. *Planta Médica* 61(2):198.
- Lorea, F. 2002. La familia Lauraceae en el Sur de México: diversidad, distribución y estado de conservación. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 71:59-70.
- Luna, M. 2003. *Litsea glaucescens*. Taxones del bosque mesófilo de montaña de la Sierra Madre Oriental incluidos en la norma oficial mexicana. Base de datos SNIB-Conabio. Proyecto W025.
- Macías, V.E. 2009. Actividad biológica (farmacológica) y/o etnomédica; y compuestos fitoquímicos aislados de algunas especies de los géneros: *Persea*, *Laurus*, *Lindera*, *Aniba*, *Phoebe*, *Nectandra*, *Cassytha*, *Cinnamomum*, *Licaria*, *Ravensara*, *Pleurothyrium*, *Dehaasia*, *Apollonias* y *Neolitsea* (Lauraceae). *Duazary* 7(1):130-151.
- Macías, V.E. 2010. Metabolitos secundarios con actividad biológica (farmacológica), aplicación etnobotánica; y fitoquímica de algunas especies de los géneros: *Ocotea*, *Cryptocarya*, *Litsea*, *Caryodaphnopsis*, *Machilus* y *Actinodaphne* (Lauraceae). *Duazary* 7(1):152-170.
- Meckes, M., M.L. Villareal, J. Tortoriello, B. Berlin y E.A. Berlin. 1995. A microbiological evaluation of medicinal plant used by the Maya people of southern Mexico. *Phytotherapy Research* 9(4):244-250.
- Miliauskas, G., P. Venskutonis. y T. van Beek. 2004. Screening of radical scavenging activity of some medicinal and aromatic plant extracts. *Food Chemistry* 85(2):231-237.
- Osuna, L., M.E. Tapia y A. Aguilar. 2005. Plantas medicinales de la medicina tradicional mexicana para tratar afecciones gastrointestinales. Estudio etnobotánico, fitoquímico y farmacológico. España. Universidad de Barcelona. 173p.
- Ozgen, M., R.N. Reese, A.Z. Tulio Jr., J.C. Scheerens y A.R. Miller. 2006. Modified 2,2-azino-bis-3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid (ABTS) method to measure antioxidant activity of selected small fruits and comparison to ferric reduction antioxidant power (FRAP) and 2,2'-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) methods. *Journal Agricultural Food Chemistry* 54:1151-1157.
- Pérez-Jiménez, J. y F. Saura-Calixto. 2006. Effect of solvent and certain food constituents on different antioxidant capacity assays. *Food Research International*, 39(7):791-800.
- Rice-Evans, C.A., N.J. Miller, P.G. Bolwell, P.M. Bramley y J.B. Pridham. 1995. The relative antioxidant activities of plant-derived polyphenolic flavonoids. *Free Radical Research* 22(4):375-383.
- Rivera, L., A. Quintanar y C. de la Paz Pérez. 1999. Comparación histoquímica de albura y duramen de tres especies de *Quercus*. *Madera y Bosques* 5(1):27-41.
- Sánchez-Moreno, C., J.A. Larrauri y F. Saura-Calixto. 1998. A procedure to measure the antiradical efficiency of polyphenols. *Journal Science Food Agricultural* 76(2):270-276.
- Santos, V. J., M. Carreón y K. C. Nelson. 1998. La organización de ejidos productores forestales de la zona maya. Un proceso de investigación participativa. Serie: Estudios de caso sobre participación campesina en generación, validación y transferencia de tecnología. Red de Gestión de Recursos Naturales. Fundación Rockefeller. 129p.
- Serrano, M.J. 2010. Evaluación de la actividad antioxidante para el aprovechamiento del muérdago que infesta la zona chinampera de Xochimilco. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa. 82p.
- Singleton, V.L. y J.A. Rossi. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture* 16(3):144-158.
- Torelli, L. 1982. Estudio promocional de 43 especies tropicales mexicanas. SARH-INIF. México. 73p.



- Tucker, A.O., M.J. Maciarello y M. Hill. 1992. *Litsea glaucescens* Humb., Bonpl. et Kunth var. *glaucescens* (Lauraceae): a Mexican bay. *Economic Botany* 46(1):21-24.
- Vallet, C., B. Chabbert, Y. Czaninski y B. Monties. 1996. Histochemistry of lignin deposition during sclerenchyma differentiation in alfalfa stems. *Annals of Botany* 78:625-632.
- Vermerris, W. y R. Nicholson. 2008. Phenolic compound biochemistry. Springer. 276p.
- Wang, J., B. Sun, Y. Cao, Y. Tian y X. Li. 2007. Optimisation of ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from wheat bran. *Food Chemistry* 106(2):804-810.

- Yan, X.H., F.X. Zhang, H.H. Xie y X.Y. Wei. 2000. A review of the studies on chemicals constituents from *Litsea* Lam. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* 8(2):171-176.

Manuscrito recibido el 4 de diciembre de 2013.

Aceptado el 12 de Julio de 2014.

Este documento se debe citar como:

Tapia-Torres, N.A., C. de la Paz-Pérez-Olvera, A. Román-Guerrero, A. Quintanar-Isaías, E. García-Márquez y F. Cruz-Sosa. 2014. Histoquímica, contenido de fenoles totales y actividad antioxidante de la hoja y de la madera de *Litsea glaucescens* Kunth (Lauraceae). *Madera y Bosques* 20(3):125-137.



Sensibilidad climática de tres versiones dendrocronológicas para una conífera mexicana

Climatic sensibility of three dendrochronological indexes for a Mexican conifer

Marín Pompa-García*, Raymundo Dávalos-Sotelo², Efraín Rodríguez-Téllez³, Oscar A. Aguirre-Calderón⁴
y Eduardo J. Treviño-Garza⁵

* Autor de correspondencia.

1 Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Juárez del Estado de Durango. mpgaia@ujed.mx

2 Red de Ambiente y Sustentabilidad. Instituto de Ecología, A.C. raymundo.davalos@inecol.edu.mx

3 Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Laboratorio de Hidrobiología, Departamento Forestal. efrainrodriguez@hotmial.com

4,5 Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. oscar.aguirrecl@uanl.edu.mx; eduardo.trevinogr@uanl.edu.mx

RESUMEN

Estudios recientes han sugerido que las variaciones climáticas tendrán implicaciones en la biogeografía de los ecosistemas. La dendrocronología representa una herramienta útil para analizar las relaciones clima - árbol. Los anillos de crecimiento usualmente son estandarizados antes del proceso de análisis para disminuir el sesgo causado por los efectos relacionados con el tamaño y la edad del árbol en lo individual. Este proceso produce índices que conservan las señales climáticas comunes en una sola cronología. Sin embargo en aplicaciones dendro-climáticas, pocos estudios documentan su capacidad sensitiva y su selección se puede tornar rutinaria sin diferenciar sus implicaciones. El objetivo de este trabajo fue comparar la sensibilidad climática de tres series dendrocronológicas de *Pinus cooperi*: Estándar (*Sd*), Residual (*Rd*), y Arstan (*Ar*). Dichas series se asociaron con datos históricos de precipitación, temperaturas, así como dos índices de patrones atmosféricos circulatorios ENSO (Niño3 y MEI). Todas las cronologías mostraron tendencias similares durante los meses de agosto a diciembre del año previo al crecimiento. No obstante, la *Rd* extendió su respuesta a signos climáticos del año actual, pero fue deficiente con ENSO. Comparativamente la *Sd* y la *Ar* destacaron su sensibilidad a fenómenos ENSO en periodos previos al crecimiento. Se concluye que la debida selección de la versión de las series dendrocronológicas es importante en interpretaciones de escenarios climáticos. Tampoco se deben considerar substitutas entre sí. Su complementación con otras herramientas mejoraría la capacidad sensitiva de los procesos ecológicos que ocurren en el bosque.

PALABRAS CLAVE: anillos de crecimiento, biogeografía, Durango, estandarización, *Pinus cooperi*.

ABSTRACT

Recent studies have suggested that climatic variations may have implications on ecosystem biogeography. Dendrochronological techniques constitute a useful tool to analyze relationships tree growth-climate. Ring widths usually are standardized before the analysis in order to remove unwanted bias due to individual growth related to stem size and age. This approach produces rings widths indices while retaining climatic signals that are in common among trees into a single chronology. However, in dendroclimatology few papers show their sensitive capacity. As a result its use could be becomes routine practice without considering their implications. The aim of this work was to assess the climate sensitivity responses of three chronologies indexes of *Pinus cooperi*: Standard (*Sd*), Residual (*Rd*), and Arstan. Such series were correlated with historical records of precipitation, temperature and two index El Niño-Southern Oscillation ENSO (Niño3 and MEI). The three chronologies showed similar trends during previous growing months (August to December). Nevertheless, *Rd* was better associated with current growing months, but showed weaker correlation with ENSO. Comparatively *Sd* and *Ar* demonstrated stronger sensibility to large-scale climatic patterns in previous growing months. It is concluded that appropriate selection of dendrochronology index is important, indicating repercussions on climatic scenarios. Neither should be considered substitutes for each other. Combining them with complementary tools would improve the sensitivity capacity of ecological processes in the forest.

KEY WORDS: Tree rings, biogeography, Durango, standardization, *Pinus cooperi*.

INTRODUCCIÓN

En dendrocronología es común crear una función media como el estimador de la señal climática de un árbol para un sitio dado (Fritts, 2001). Este proceso conocido como estandarización, elimina el efecto inherente a la edad y a la geometría del árbol incrementando la calidad de la señal (Cook, 1987). Usualmente se generan tres versiones de índices dendrocronológicos conocidos como índice de ancho de anillos: Estándar (*Sd*), Residual (*Rd*), y Arstan (*Ar*) (Cook y Holmes, 1986). Sin embargo, raramente se documentan las implicaciones dendro-climáticas de usar uno u otro, haciendo su selección rutinaria.

En varias investigaciones se ha modelado la sensibilidad de especies forestales a fenómenos climáticos (Adams y Kolb, 2005; González-Elizondo *et al.*, 2005; Candel Pérez *et al.*, 2012), incluyendo asociaciones con patrones circulatorios de gran escala (i.e. el Niño) (Cleaveland *et al.*, 2003; Cerano *et al.*, 2011; Rozas y García-González, 2013). Todos estos estudios han basado sus correlaciones en índices dendrocronológicos; sin embargo, no se ha documentado una comparación de la utilidad de las diferentes versiones dendrocronológicas, asumiendo la misma sensibilidad ante la señal climática.

Recientes estudios sugieren que los ecosistemas forestales estarán en riesgo a consecuencia de las variaciones climáticas (Seager *et al.*, 2007; Williams *et al.*, 2012). Entender las repercusiones de estas en la composición y estructura de la vegetación es una preocupación constante (Lo *et al.*, 2010; Candel-Pérez *et al.*, 2012). Las relaciones clima - árbol constituyen un aspecto clave para predecir los impactos de las variaciones climáticas en las comunidades vegetales (Beniston, 2002). Particularmente ello recobra importancia ecológica en aquellas especies representativas de ecosistemas forestales.

Pinus cooperi es una especie endémica y dominante en la Sierra Madre Occidental (García y González, 2003; González-Elizondo *et al.*, 2007; Cruz *et al.*, 2008; González-Elizondo *et al.*, 2013). Su amplitud ecológica provee una buena oportunidad de evaluar su potencial dendro-climático en función de la sensibilidad de los diferentes índices de anillos. Esta especie ha sido identificada como

una con potencial para reconstruir la variabilidad climática del norte de México (Cerano *et al.*, 2012). Conocer las implicaciones de utilizar cada serie dendrocronológica representa información valiosa para monitorear la sensibilidad climática ante diversos escenarios climáticos y ecológicos (Viveros-Viveros *et al.*, 2009; Williams *et al.*, 2012).

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo fue analizar la sensibilidad de tres versiones de una serie dendrocronológica, ante variables climáticas asociadas al crecimiento radial de *Pinus cooperi*. Se plantea como hipótesis que hay una respuesta diferenciada de los índices de anillo a los signos climáticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

La zona de estudio se localizó en la Sierra Madre Occidental en el estado de Durango, México, en las coordenadas extremas 24°8'30" N, 105°3'25" W, y 24°4'40" N, 105°1'15" W (Fig. 1). La vegetación de la zona de estudio se compone de *Pinus cooperi*, *Pinus duranguensis*, *Pinus arizonica*, *Pinus ayacahuite*, *Pseudotsuga menziesii*, *Abies durangensis*, *Arbutus xalapensis* y varias especies de *Quercus* spp. (González-Elizondo *et al.*, 2007; González-Elizondo *et al.*, 2013). El clima es templado semifrío, con un verano fresco sub-húmedo (Pompa, 2012).

Muestreo y construcción de cronologías

Se seleccionaron 10 árboles de *Pinus cooperi* localizados en sitios de pobre calidad de estación, con la misma pendiente y exposición para reducir su efecto en el crecimiento. De cada árbol seleccionado, se tomaron tres muestras de madera por árbol con el apoyo de taladros de Pressler de diferentes dimensiones. Como medida de suficiencia del tamaño de la muestra se usó el estadístico EPS (señal expresada de la población), recomendado para estudios paleoclimáticos (Mérián *et al.*, 2013). Se evitó muestrear arboles dañados y deformes, así como aquellos cuyo crecimiento hubiera estado sujeto a competencia por la luz y nutrientes.

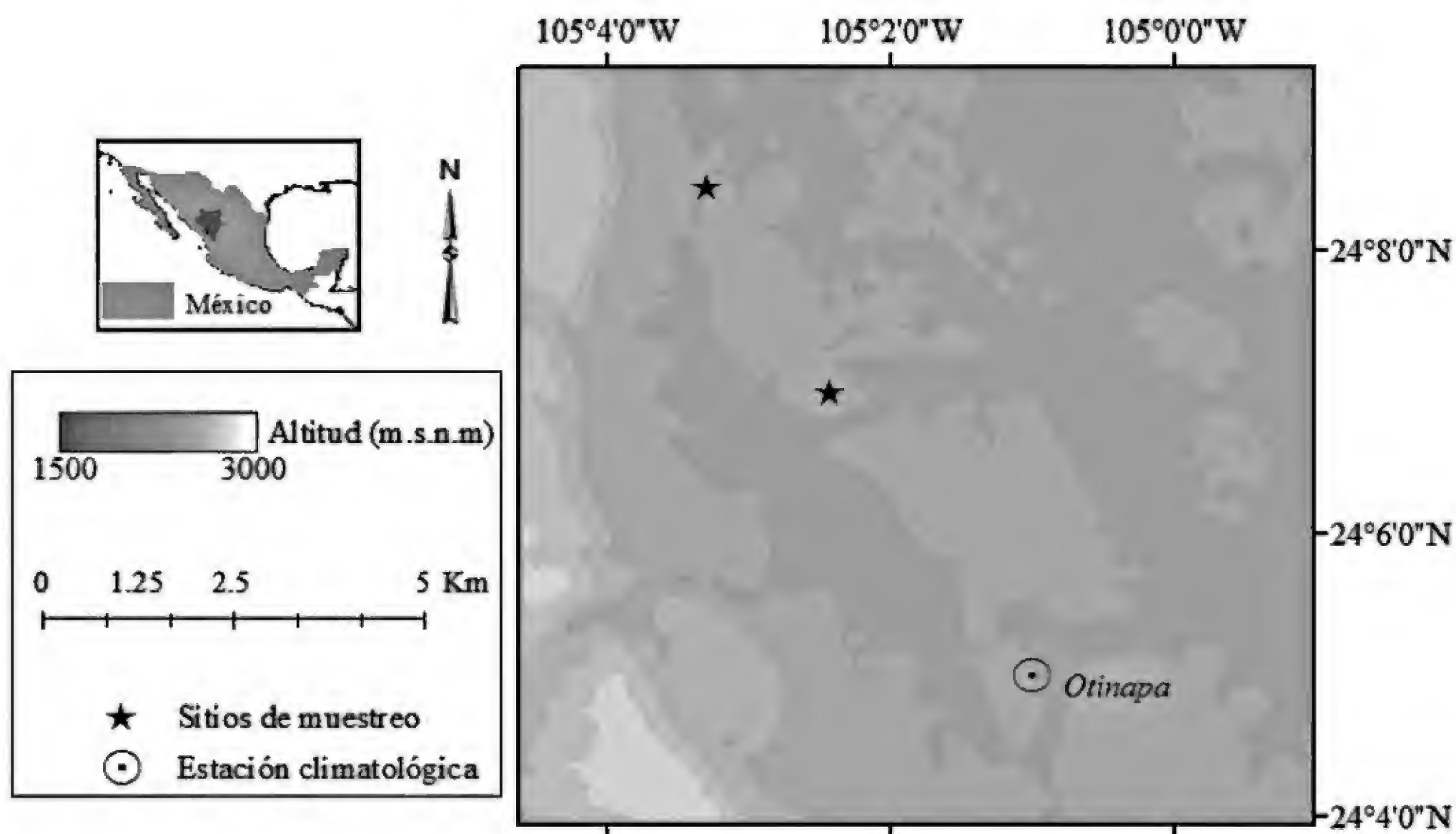


FIGURA 1. Localización del área de estudio mostrando la estación meteorológica más cercana y los sitios donde fueron obtenidas las muestras de *Pinus cooperi*.

Cada uno de los especímenes fue procesado usando procedimientos dendrocronológicos estándar para fechar el año exacto de la formación de los anillos de crecimiento (Stokes y Smiley, 1968). La calidad de las mediciones y el fechado de los datos, fue verificado estadísticamente usando el programa COFECHA (Holmes, 1983).

Las tendencias biológicas y geométricas no relacionadas con el clima fueron removidas usando el programa ARSTAN (Cook y Holmes, 1986). Las series primero se ajustaron a una función exponencial negativa y luego a una cúbica *spline* con 50% de frecuencia de respuesta a 64 años. Esto fue suficientemente flexible para reducir la variabilidad no climática, preservando la señal del clima local. De esta forma se generaron tres índices de anillo o cronologías: 1) *Sd*, en la cual los índices de ancho de anillo de cada serie que compone la muestra son promediados estadísticamente; 2) *Rd*, derivada de los valores residuales

provenientes del modelo de auto-regresión (i.e. eliminando la auto-correlación entre anillos); y 3) *Ar*, en la cual se incorporan los coeficientes del modelo de regresión a los valores residuales previamente logrados desde el modelo de auto-regresión.

Datos climáticos y análisis estadístico

Para correlacionar las series dendrocronológicas con las variables climáticas, se utilizaron los datos climáticos disponibles del año 1962 al 2010. La estación meteorológica correspondió a “Otinapa” (CNA, 2012), dada su proximidad a los sitios de muestreo (Fig. 2). En la figura 3 se presenta la serie de tiempo de la temperatura promedio anual y la precipitación anual para el período 1964-2007 para la cual se disponía de datos diarios, obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). En la figura 4 se presenta la serie de tiempo para las variables de temperatura

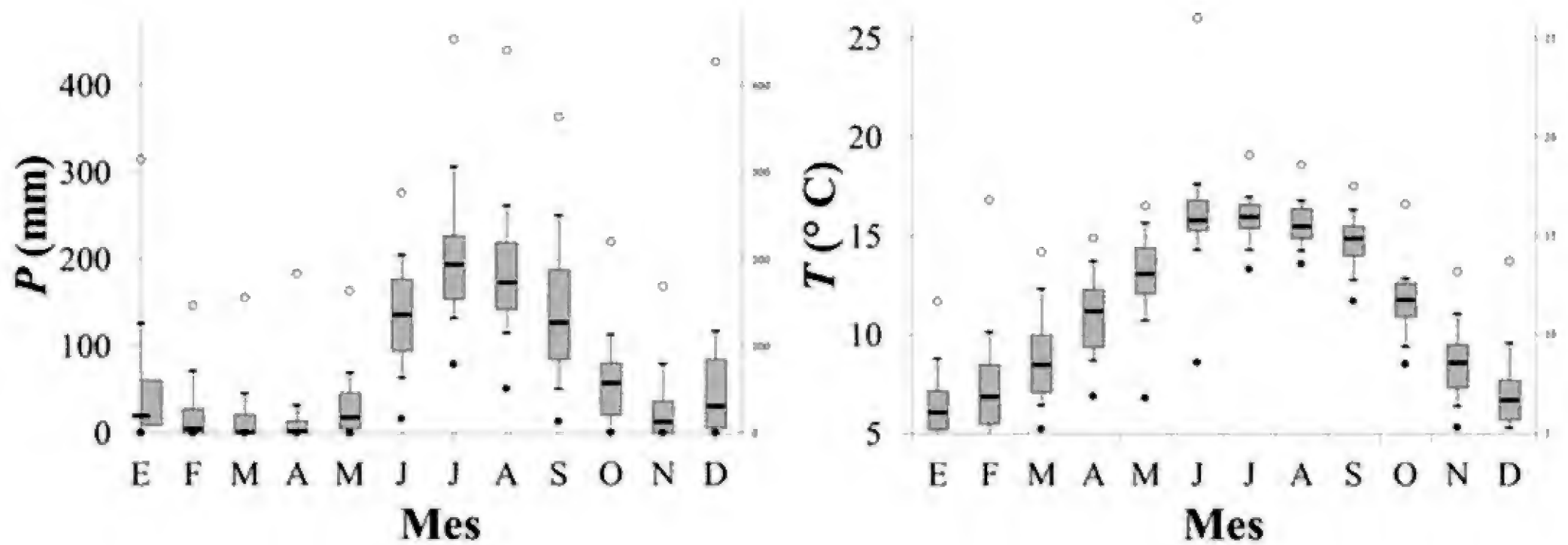


FIGURA 2. Diagramas climáticos de la estación “Otinapa, Durango” (1962-2010). Datos disponibles en CNA (2012).

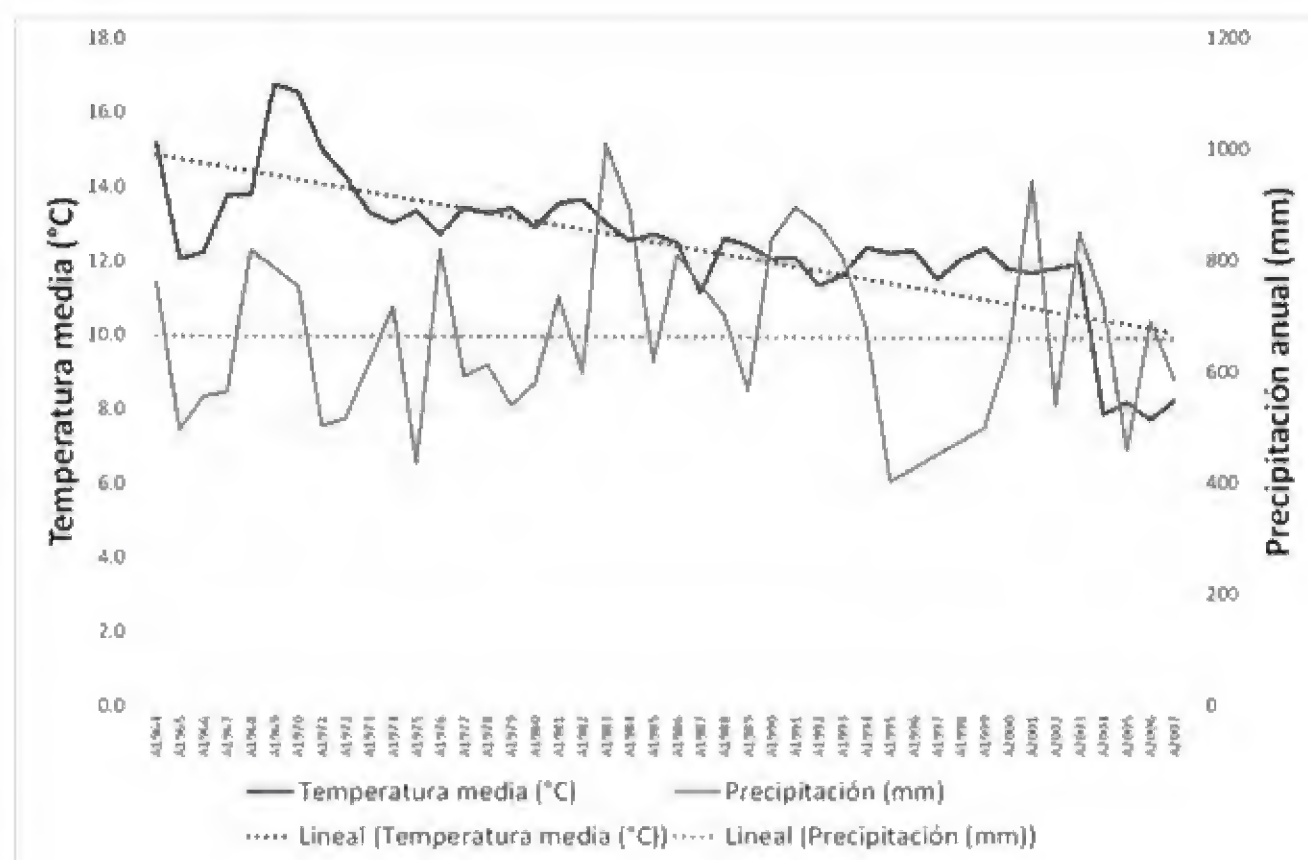


FIGURA 3. Serie de tiempo de datos climáticos de la Estación Otinapa (periodo 1964-2007).

máxima, media y mínima anuales para el mismo período. Se observa que no hay un cambio discernible en la precipitación para esos años, al no haber una tendencia a la alza o a la baja. En cambio, para la temperatura, se detectó una tendencia clara a la disminución de los valores. El modelo planteado aquí debería ser capaz de detectar dichas variaciones. En la figura 5 se muestra la distribución de la temperatura promedio en la zona de estudio y

en la figura 6, la precipitación de la misma región. Se observa que la temperatura aumenta en dirección noreste, apuntando a la región desértica del estado y a zonas más bajas. La temperatura disminuye en dirección a las zonas montañosas. La distribución de la precipitación es consistente con esta información: menor hacia la zona seca (noreste), aumentando en la dirección a las partes altas de la zona de la Sierra Madre Occidental.

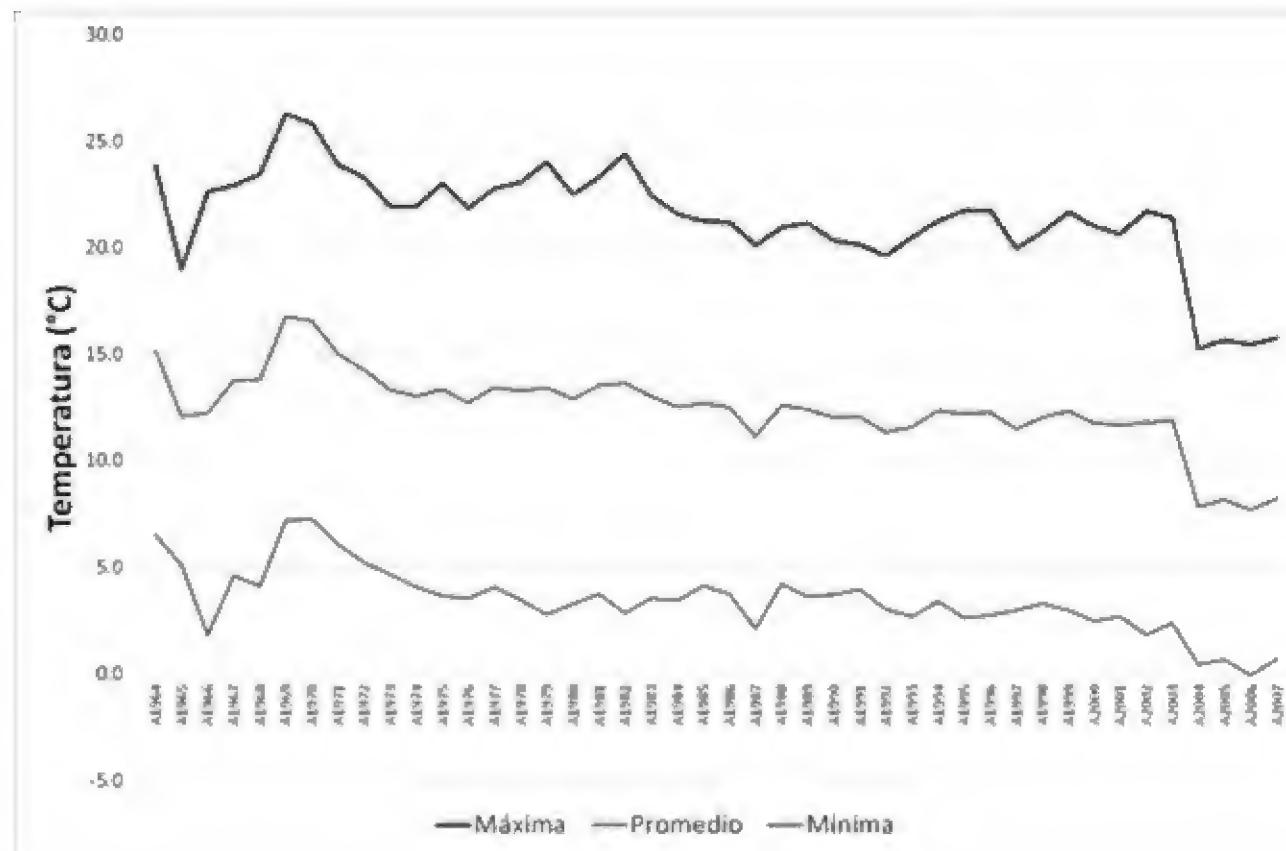


FIGURA 4. Serie de tiempo de datos de temperatura de la Estación Otinapa (periodo 1964-2007).

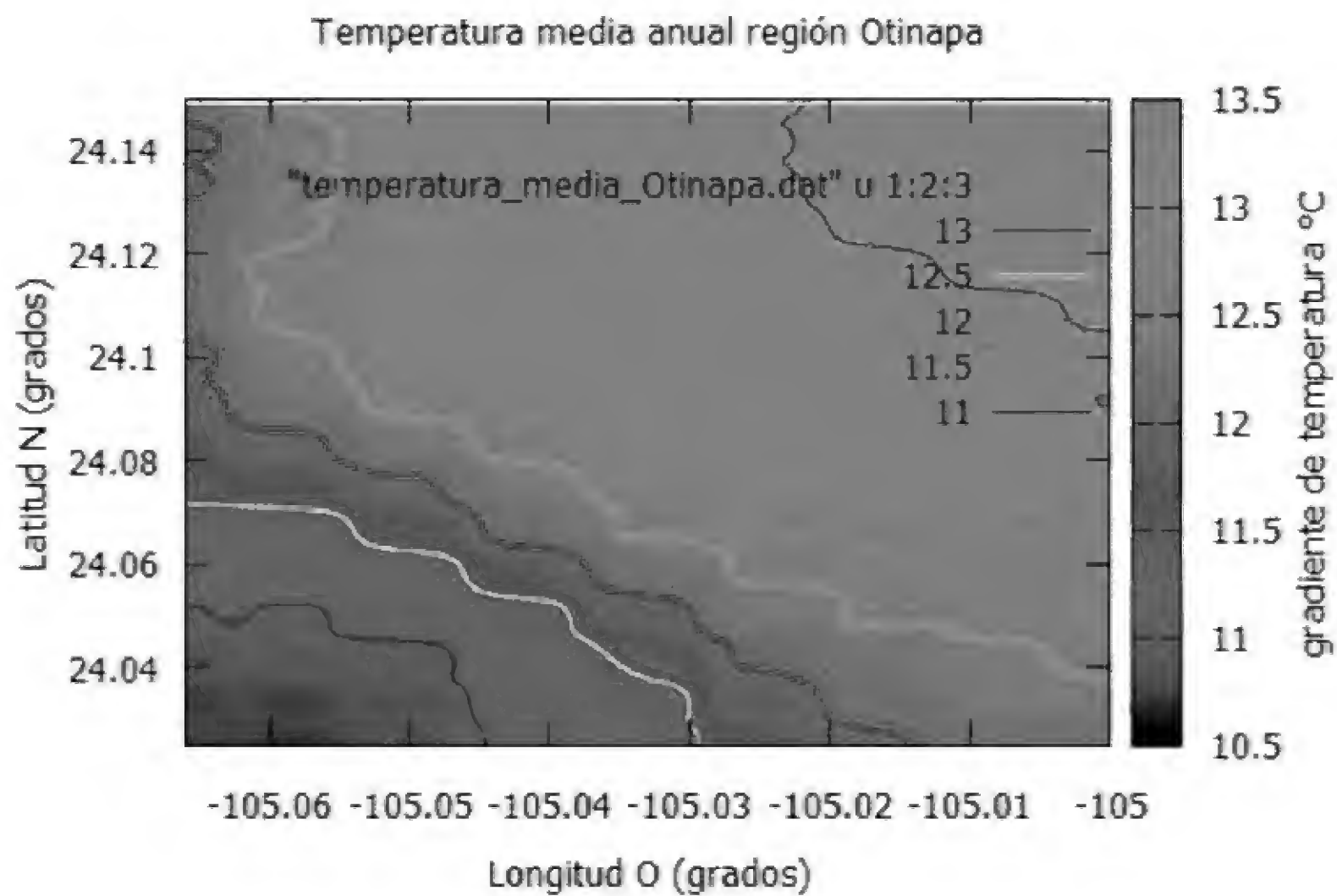


FIGURA 5. Temperatura media anual de la región Otinapa, Dgo.

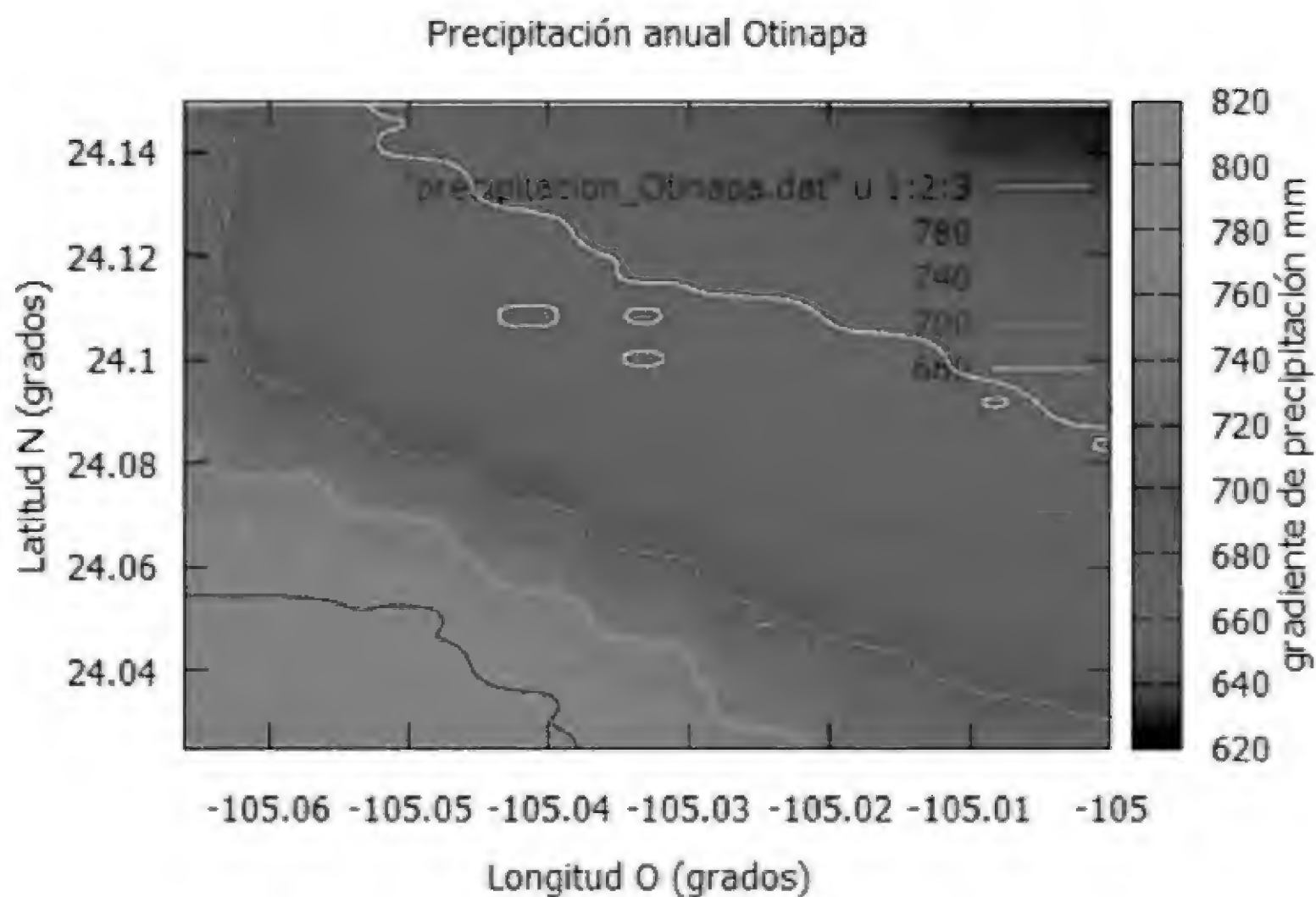


FIGURA 6. Precipitación anual de la región de Otinapa, Dgo.

Los datos para elaborar las figuras 5 y 6 fueron obtenidos del Atlas Climático Digital de México (CCA-UNAM, 2013) y se elaboraron con el *software* de acceso libre *gnuplot* (<http://www.gnuplot.info/>).

Las variables climáticas consideradas en la correlación entre las series dendrocronológicas y las variables climáticas fueron la precipitación mensual total (*PP*) en mm, la temperatura máxima y mínima mensual (*Tmax* y *Tmin*) en °C, así como dos índices de patrones atmosféricos circulatorios conocidos como El Niño Southern Oscillation (ENSO): El Multivariate ENSO index (*MEI*), definido como el principal componente de variación estacional de seis variables océano-atmosféricas en la cuenca tropical del pacífico (Wolter y Timlin 2011). Los datos del *MEI* fueron obtenidos de la página de internet del NOAA Earth System Research Laboratory (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html>) para cada uno de los doce meses. Complementariamente, con fines comparativos se usó el *Niño3*, cuyos datos se obtuvieron desde <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.Indices/.nino/.EXTENDED/>. Este parámetro se define como la diferencia estandarizada de

la presión del nivel del mar entre Tahiti en el Pacífico Este y Darwin al Norte de Australia (Troup, 1965).

Para el periodo 1962-2010, todas las cronologías de anillos fueron correlacionadas con *PP*, *Tmax* y *Tmin* y ENSO (*MEI*, *Niño3*), utilizando el programa DendroClim2002 (Biondi y Waikul, 2004). Este software calcula la significancia estadística de los coeficientes de correlación, con 1000 réplicas de cada dato en un re-muestreo aleatorio.

RESULTADOS

Evaluación de las cronologías de anillos.

La inter-correlación y sensibilidad medias fueron 0,61 y 0,45; respectivamente. La longitud de la cronología fue de 111 años. Los índices de anillos mostraron similares tendencias entre sí, decreciendo por debajo de la media antes de 1920, 1955, 1975, 1980, 1990 y 2000, y ascendiendo de manera sincronizada a partir de 1920, 1930, 1970, 1985 y 2005 (Fig. 7). Ello significó que las series estaban bien replicadas según el estadístico EPS, cuyo valor fue de 0,86.

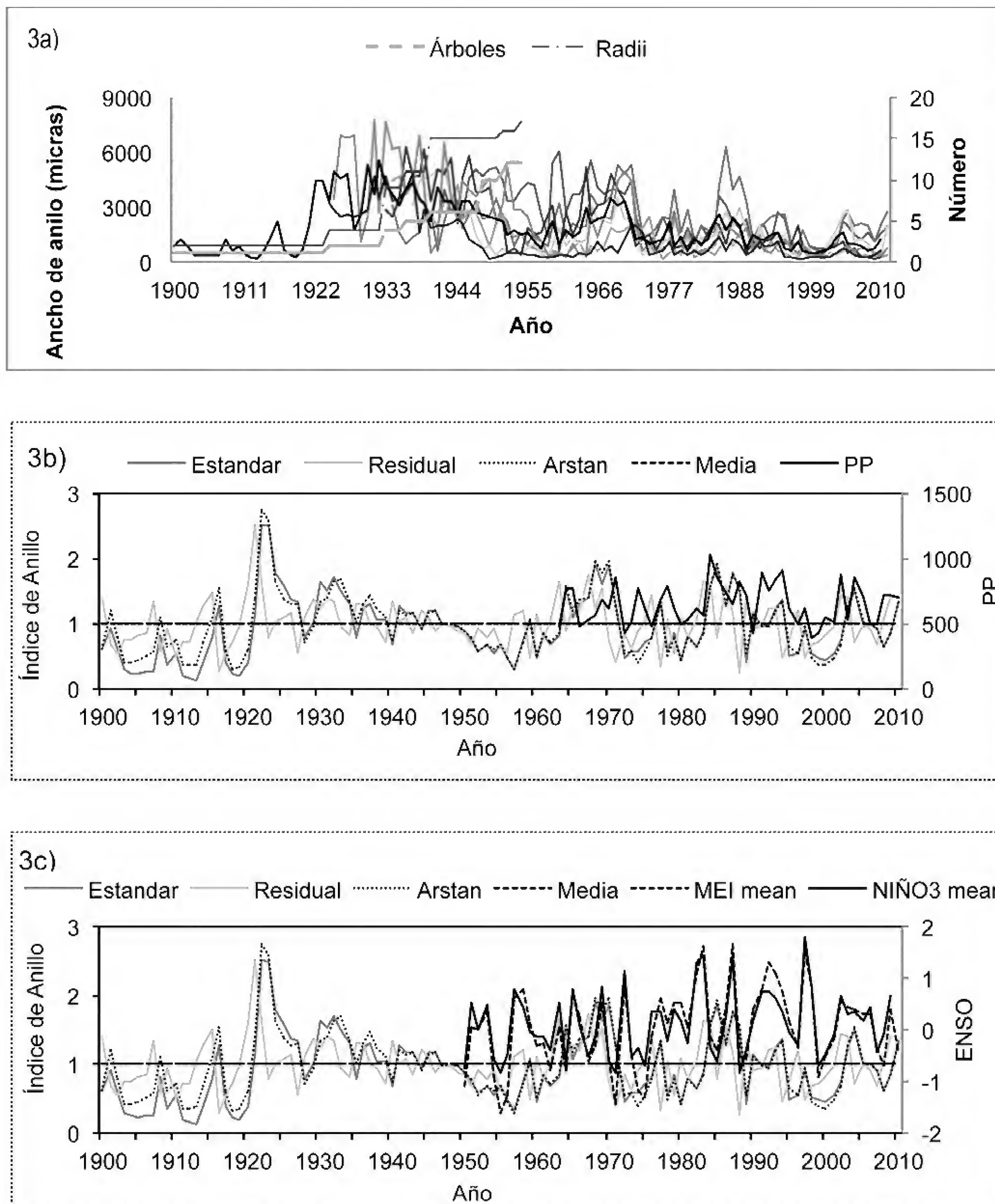


FIGURA 7. Tamaño muestral y anchos de anillo (3a), así como los índices dendrocronológicos generados para *Pinus cooperi* asociados con precipitación (3b) y con ENSO (3c).

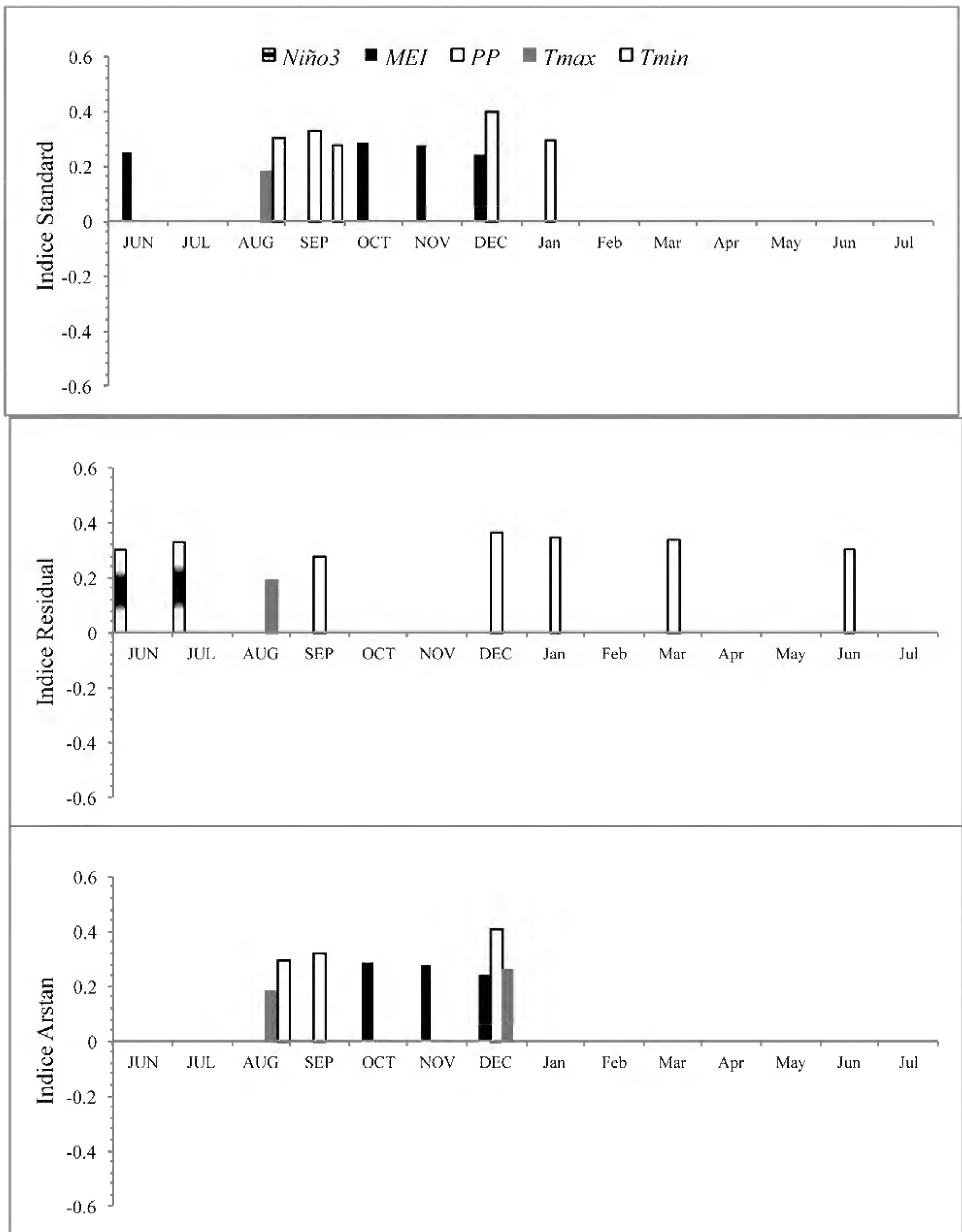
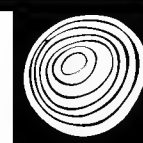


FIGURA 8. Correlaciones de las series dendrocronológicas de *Pinus cooperi* con las variables climáticas de 1962 al 2010 (valores $p < 0.05$ estadísticamente significativos).



Relación de series dendrocronológicas con datos climáticos

El análisis de correlación de los índices con *PP*, *Tmax*, *Tmin* y el ENSO mostró asociación positiva y significativa sobre el área de estudio, con coeficientes que variaron de 0 a 0,40 (Fig. 8). Los coeficientes de Pearson (significativos al 0,05) indicaron que la *PP* se correlacionó positivamente para todos los índices de anillo. Para el *Sd* la *PP* tuvo asociación con el mes de septiembre y diciembre del año anterior, y enero del año de crecimiento. Para *Rd*, *PP* se relacionó con mayor amplitud desde septiembre y diciembre del año previo, hasta enero, marzo y junio del año actual. Mientras que para el índice *Ar*, solo lo hizo con septiembre y diciembre del año anterior.

En relación con *Tmax*, se evidenció una asociación menor para *Sd* y *Rd* en agosto del año anterior, mientras que para *Ar* se extendió hasta diciembre del mismo año. Respecto a *Tmin*, solo hubo evidencia de correlación con agosto del año previo para *Ar*, ampliándose a septiembre en *Sd*. Las relaciones con los patrones circulatorios ENSO indicaron dos tendencias claramente diferenciadas: *Sd* y *Ar* fueron consistentes con *MEI*, particularmente de octubre a diciembre del año previo, mientras que *Niño3* solo tuvo influencia en *Rd* durante junio y julio del mismo año.

DISCUSIÓN

Los valores de inter-correlación y sensibilidad medias fueron similares a aquellos publicados para cronologías de coníferas creciendo en ecosistemas vecinos (Cleaveland *et al.*, 2003; Santillán *et al.*, 2010). Igualmente, la EPS ($> 0,85$) proporcionó información confiable como un estimador de la calidad de la señal climática del tamaño de muestra empleado (Mérian *et al.*, 2013). Este análisis comparativo de los índices cronológicos constituyen el primer estudio relativo a *Pinus cooperi*. Aunque se detectaron mínimas diferencias gráficas en las tres versiones, todas ellas mostraron tendencias generales y comparables entre sí. Un periodo de incremento precedido por un decremento en el crecimiento fue notable durante los años 1920s, 1960s, 1980s, 1990s y 2000s. A su vez resultó coincidente con las sequías regionales severas identifica-

das para el área de influencia (Díaz *et al.*, 2002; Therrell *et al.*, 2002).

Los resultados de la figura 8 indican que el crecimiento radial de *Pinus cooperi* es influenciado por las lluvias de invierno. Ello resulta coincidente con varios autores que argumentan que la humedad almacenada durante el periodo de latencia (i.e. invierno) constituye una reserva importante para la siguiente estación de crecimiento (Litton *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2010). Adicionalmente, las lluvias del periodo primavera-verano favorecen también el desarrollo radial, como lo detectó la serie *Rd*. Cuando el crecimiento celular ha comenzado, la disponibilidad de humedad es fundamental para activar el metabolismo del árbol y, por ende, su crecimiento. La distribución de carbohidratos es de mayor importancia para la expansión de hojas y raíces, afectando subsecuentemente el crecimiento radial (Misson *et al.*, 2004).

En relación con la asociación positiva de las temperaturas, Lo *et al.* (2010) sugieren que, asociadas con la disponibilidad de agua, contribuyen a extender la estación de crecimiento; por consiguiente el árbol genera más biomasa y por tanto mayor crecimiento. Estos resultados son consistentes con estudios previos en otras coníferas en áreas montañosas (Lebourgeois, *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2010).

Las asociaciones gráficas de las diferentes cronologías con los patrones atmosféricos ENSO, mostraron correspondencias cíclicas irregulares (Fig. 7c). Es notable la coherencia entre los índices de anillo y los patrones circulatorios durante el periodo de análisis, en especial en eventos extremos. Para la fase fría (i.e. La Niña) sobresalen los ocurridos en los años 1955, 1964, 1971, 1985, 1988 y 1999. Similarmente y de manera casi sincronizada, se presentan eventos en su fase cálida (i.e. El Niño) durante 1951, 1953, 1957, 1965, 1969, 1972, 1983, 1987, 1991, 1997 y 2002. Estos periodos resultan coincidentes con aquellos mencionados por Cerano *et al.* (2011) para la parte alta de la Cuenca del Río Nazas, reconocida como susceptible a la influencia del ENSO por su cercanía al litoral del océano Pacífico.

Diversos estudios han puesto de manifiesto las teleconexiones de ENSO con el crecimiento de anillos en el norte de México (Seager *et al.*, 2009; Méndez and Magaña, 2010; Stahle *et al.*, 2012; Irby *et al.*, 2013). En estos estudios aplicaron al índice convencional de anillos de crecimiento una variable de la base de datos de la oscilación sur o *Niño3*. Según (Wolter y Timlin, 2011) resulta menos confiable respecto al recién desarrollado *MEI*, catalogado como más robusto (ver <http://www.noaa.esrl.noaa.gov/psd/people/klauss.wolter/MEI>). De acuerdo con los resultados de este estudio, la conexión del crecimiento de *P. cooperi* se asocia con los periodos precedentes del crecimiento. ENSO provoca mayores precipitaciones en el norte de México durante su fase cálida (Brienen *et al.*, 2010; Cleaveland *et al.*, 2003). Por ello es notable la asociación del *MEI* en las versiones *Sd* y *Ar*; mientras *Niño3* permanece fijo a su dominio espacial, el *MEI* permite variaciones espaciales con su ciclo estacional mejorando la calidad en sus mediciones (Wolter y Timlin, 2011).

Aunque los tres índices cronológicos revelaron ciertas coincidencias con elementos climáticos del año previo (*Tmax* en agosto y *PP* en septiembre y diciembre), también se observaron diferentes asociaciones. La *Sd* mostró mayor correlación con casi todos los elementos climáticos del año anterior, excluyendo solo al *Niño3*. Dado que esta cronología presenta auto-correlación, su conducta tiene coherencia con lo señalado por Fritts (2001), indicando influencia del crecimiento de un año previo en el siguiente. Esta auto-correlación temporal puede implicar un error estadístico, ya que el cálculo de las probabilidades puede invalidarse. Hart *et al.* (2010), resaltan a esta cronología como la mejor correlacionada con más elementos del clima durante periodos más largos para una conífera en Norteamérica. Similares resultados se describen para bosques boreales a lo largo de gradientes altitudinales, donde las temperaturas de años previos y actuales mostraron correlaciones consistentes con el incremento radial de las especies estudiadas (Huang *et al.* 2010).

En el caso de la serie *Rd* distinguió su correlación en un periodo mayor, en particular para la precipitación,

aunque fue la única sensible al *Niño3*. Esta cronología elimina la correlación del ancho de un anillo de un año determinado con el de años anteriores (Cook y Holmes, 1986). En consecuencia, diversos autores sostienen que presenta una correlación más alta con las variables climáticas, siendo comúnmente utilizada para este tipo de asociaciones (González y Veblen, 2006; Santillan *et al.*, 2010; Bickford *et al.*, 2011). De acuerdo con Fritts (2001), la ausencia de autocorrelación entre los anillos de crecimiento presenta una ventaja para los análisis posteriores de regresión donde se exige este supuesto. Jönsson y Nilsson (2009) destacan sus bondades comparativas, en particular con la asociación entre crecimiento de madera temprana de *Pinus sylvestris* y la precipitación mensual.

Por último, el índice *Ar* exhibió una conducta temporalmente más corta, con asociaciones positivas de agosto a diciembre del año previo, pero similar a la *Sd*. Para Grissino-Meyer *et al.* (1996), esta serie intenta contener las señales climáticas más fuertes posibles. Harley *et al.* (2011), mencionan que todas las dendrocronologías mostraron similitudes en un estudio dendroclimático de *Pinus elliottii*. No obstante, destacan en que la *Ar* resultó comparativamente mejor para explicar la influencia del clima en el crecimiento radial de la especie. Kalela-Brundin, (1999), comparó las tres versiones de cronologías para reconstrucción climática de *Pinus sylvestris* encontrando que las versiones *Ar* y *Sd* son muy afines, resaltando la capacidad de la primera para captar la señal climática. Sin embargo, en experiencias previas, se ha encontrado que la *Ar* tiene cierta auto-correlación “informativa”, sugiriendo compararla con *Rd*. Alternativamente, se recomienda calcular las probabilidades corregidas por la presencia de auto-correlación de acuerdo con el procedimiento usado por Mudelsee (2003).

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio indicaron que las series dendrocronológicas de *P. cooperi* registran diferencias en sensibilidad a las variables climáticas, reforzando la hipótesis aquí planteada de que el método de estandarización es particularmente relevante. La debida selección de la ver-



sión dendrocronológica a elegir en los análisis climáticos puede resultar importante; particularmente en la interpretación de la sensibilidad de las especies forestales ante elementos climáticos. El conocimiento de las implicaciones de usar los diferentes índices dendrocronológicos da mayor información de soporte para diseñar estrategias de manejo mejor fundamentadas. Las correlaciones de las tres series fueron coincidentes en meses del año previo al crecimiento. No obstante, la *Rd* mostró mejor capacidad para responder a signos climáticos del año actual. Las series dendrocronológicas no se consideran substitutas entre sí. Cada una de ellas provee diferentes tipos de información y requiere análisis detallados.

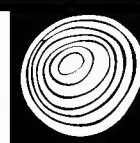
RECONOCIMIENTOS

Este trabajo se realizó dentro del marco de movilidad académica apoyado por el Conacyt: “Estancias Posdoctorales y Sabáticas al Extranjero para la Consolidación de Grupos de Investigación”. Se reconoce el apoyo de la Escuela Forestal del Norte de Arizona, y del Laboratorio de Dendrocronología del INIFAP CENID-RASPA. De manera particular se agradece a Julián Cerano Paredes y Omar Duran Guerra por su colaboración en colección y procesamiento de datos de campo y a J. J. Camarero por sus valiosos comentarios referentes al análisis de probabilidades de la auto-correlación temporal.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, H.D. y T.E. Kolb. 2005. Tree growth response to drought and temperature in a mountain landscape in northern Arizona, USA. *Journal of Biogeography* 32:1629–1640.
- Beniston, M. 2002. Climate modeling at various spatial and temporal scales: where can dendrochronology help? *Dendrochronologia* 20:117–131.
- Bickford I N., Z.P. Fulé y T.E. Kolb. 2011. Growth sensitivity to drought of co-occurring *Pinus* spp. along an elevation gradient in northern Mexico. *Western North American Naturalist* 71(3):338–348.
- Biondi, F. y J. Waikul. 2004. DENDROCLIM2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences* 30(3):303–311.
- Brienen, R.J.W., E. Lebrija-Trejos, P.A. Zuidema, y M. Martínez-Ramos. 2010. Climate-growth analysis for a Mexican dry forest tree shows strong impact of sea surface temperatures and predicts future growth declines. *Global Change Biology* 16(7):2001–2012.
- Candel-Pérez, D., J.C. Linares, B. Viñegla y M.E. Lucas-Borja. 2012. Assessing climate–growth relationships under contrasting stands of co-occurring Iberian pines along an altitudinal gradient. *Forest Ecology and Management* 274:48–57.
- Cerano-Paredes, J., J. Villanueva-Díaz, R. D. Valdez-Cepeda, J. G. Arreola-Ávila, y V. Constante-García, V. 2011. El Niño oscilación sur y sus efectos en la precipitación en la parte alta del Rio Nazas. *Revista Chapingo Serie de Ciencias Forestales y del Ambiente* 17:207–215.
- Cerano-Paredes, J., M. Rivera-González, J. Estrada-Avalos, R. Trucíos-Caciano y J.C Ríos-Saucedo. 2012. Análisis dendrocronológico de *Pinus cooperi* EN Durango, México. *Recursos Forestales Agrofaz* 12(3):81–88.
- Chen, P., C. Welsh y A. Hamann. 2010. Geographic variation in growth response of Douglas-fir to inter-annual climate variability and projected climate change. *Global Change Biology* 16(12):3374–3385.
- Cleaveland, M.K., D.W. Stahle, M.D. Therrell, J. Villanueva-Díaz y B.T. Buns. 2003. Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change* 59:369–388.
- Cook, E.R. y R.L. Holmes. 1986. Users’ manual for program ARSTAN. In: R.L. Holmes, R.K. Adams, y H.C. Fritts, eds. Tree-ring chronologies of western North America: California, eastern Oregon and northern Great Basin. University of Arizona. Tucson, Ariz. p:50–56.
- Cook, E.R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin* 47:37–59.
- CCA-UNAM (Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México). 2013. Atlas Climático Digital de México. Parámetros Bioclimáticos 1902–2011. Disponible en <http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/kml>. Consultado el 11 de marzo de 2014.

- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2012. Datos climáticos de estaciones meteorológicas de Durango: Otinapa.
- Cruz, C.F., H.M. de los Santos P. y J.R. Valdez L. 2008. Sistema compatible de ahusamiento-volumen para *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México. *Agrociencia* 42(4):473-485.
- Díaz S., C., M.T. Therrell, D.W. Stahle y M.K. Cleaveland. 2002. Chihuahua winter - spring precipitation reconstructed from tree - rings. *Climate Research* 22:237-244.
- Fritts, H.C. 2001 Tree Rings and Climate. Blackburn Press. Caldwell, Nueva Jersey. 567 p.
- García-Arévalo, A. y M.S. González-Elizondo. 2003. Pináceas de Durango. Instituto de Ecología, A.C. y Comisión Nacional Forestal, 2ª ed. Xalapa, Ver. y Zapopan, Jal. 187 p.
- González-Elizondo, M.S., M. González-Elizondo y M.A. Márquez-Linares. 2007. Vegetación y ecorregiones de Durango. Plaza y Valdés, S.A. de C.V. México, D.F. 221 p.
- González-Elizondo M., E. Jurado, J. Navar, M.S. Gonzalez-Elizondo, J. Villanueva, O. Aguirre, J. Jiménez. 2005. Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: a 1681–2001 rain reconstruction. *Forest Ecology and Management* 213(1-3):39-53.
- González-Elizondo, M.S., M. González-Elizondo, L. Ruacho-González, I.L. López-Enríquez, F.I. Retana-Rentería y J.A. Tena-Flores. 2013. Ecosystems and Diversity of the Sierra Madre Occidental. In: G.J. Gottfried, P.F. Ffolliott, B.S. Gebow, L.G. Eskew y L.C. Collins, comps. 2013. Merging science and management in a rapidly changing world: Biodiversity and management of the Madrean Archipelago III; 2012 May 1-5; Tucson, AZ. Proceedings. RMRS-P-67. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- González M., E. y T.T. Veblen. 2006. Climatic influences on fire in *Araucaria araucana*–*Nothofagus* forests in the Andean cordillera of south-central Chile. *Ecoscience* 13(3): 342–350.
- Grissino-Mayer, H.D., R.L. Holmes y H.C. Fritts. 1996: The international tree-ring data bank. Program library version 2.0 user's manual. Tucson, USA, 106pp.
- Harley G., L., H.D. Grissino-Mayer y S.P. Horn. 2011. The dendrochronology of *Pinus elliottii* var. densa in the Lower Florida Keys: Chronology development and climate response. *Tree-Ring Research* 67(1):39-50.
- Hart, J.L., S.L. van de Gevel, J. Sakulich y H.D. Grissino-Mayer. 2010. Influence of climate and disturbance on the growth of *Tsuga canadensis* at its southern limit in eastern North America. *Trees* 24:621–633
- Holmes, R.L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-78.
- Huang, J., J.C. Tardif, Y. Bergeron, B. Denneker, F. Berninger y M. P. Girardin. 2010. Radial growth response of four dominant boreal tree species to climate along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest. *Global Change Biology* 16(2):711-731.
- Irby, C.M., P.Z. Fulé, L.L. Yocom y J. Villanueva Díaz. 2013. Dendrochronological reconstruction of long-term precipitation patterns in Basaseachi National Park, Chihuahua, Mexico. *Madera y Bosques* 19(1):93-105.
- Jönsson, K. y C. Nilsson. 2009. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on shingle fields: a dendrochronologic reconstruction of early summer precipitation in Mideast Sweden. *Journal of Climate* 22(17):4710-4722.
- Kalela-Brundin, M. 1999. Climatic information from tree-rings of *Pinus sylvestris* L., and a reconstruction of summer temperatures back to AD 1500 in Femundsmarka, eastern Norway, using partial least squares regression (PLS) analysis. *The Holocene* 9(1):59-77.
- Lebourgeois, F., P. Mérian, F., Courdier, J., Ladier, y P. Dreyfus. 2012. Instability of climate signal in tree-ring width in Mediterranean mountains: a multi-species analysis. *Trees* 26(3):715–729.
- Litton, C.M., J.W. Raich y M.G. Ryan. 2007. Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology* 13(10):2089-2109.
- Lo, Y.H., J.A. Blanco, B. Seely, C., Welham y J.P., Kimmins. 2010. Relationships between climate and tree radial growth in interior British Columbia, Canada. *Forest Ecology and Management* 259(5):932-942.



- Méndez M. y V. Magaña. 2010: Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America. *Journal of Climate* 23(5):1175-1188.
- Mérian, P., J.C. Pierrat y F. Lebourgeois. 2013. Effect of sampling effort on the regional chronology statistics and climate-growth relationships estimation. *Dendrochronologia* 31(1):58-67.
- Misson L., C. Rathgeber y J. Guiot. 2004. Dendroecological analysis of climatic effects on *Quercus petraea* and *Pinus halepensis* radial growth using the process-based MAIDEN model. *Canadian Journal of Forest Research* 34(4):888-898.
- Mudelsee, M. (2003). Estimating Pearson's correlation coefficient with bootstrap confidence interval from serially dependent time series. *Mathematical Geology* 35(6):651-665.
- Pompa G., M. 2012. Geographic information systems for Durango's ecosystems. Disponible en <http://www.ujed.mx/sigeed/Inicio.aspx>. Recuperado el 8 de marzo de 2012.
- Rozas V. e I. García-Gonzalez. 2012. Non-stationary influence of El Niño-Southern Oscillation and winter temperature on oak latewood growth in NW Iberian Peninsula. *International Journal of Biometeorology* 56(5):787-800.
- Santillán-Hernández, M., E. Cornejo-Oviedo, J. Villanueva-Díaz, J. Cerano-Paredes, S. Valencia-Manzo y A. Capó-Arteaga. 2010. Potencial dendrocronológico de *Pinus pinceana* Gordon en la Sierra Madre Oriental. *Madera y Bosques* 16(1): 17-30.
- Seager, R., M. Ting, I. Held, Y. Kushnir, J. Lu, G. Vecchi, H.P. Huang, N. Harnik, A. Leetmaa, N.C. Lau, C. Li, J. Velez y N. Naik. 2007: Model projections of an imminent transition to a more arid climate in southwestern North America. *Science* 316(5828):1181-1184.
- Seager, R.M., M. Ting, M. Davis, M. Cane, N. Naik, J. Nakamura, C. Li, E. Cook, y D.W. Stahle. 2009. Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmósfera* 22(1):1-31.
- Stahle D.W., D.J. Burnette, J. Villanueva-Díaz, R.R. Heim Jr, F.K. Fye F., J. Cerano-Paredes, R. Acuna-Soto y M.K. Cleaveland. 2012. Pacific and Atlantic influences on Mesoamerican climate over the past millennium. *Climate Dynamics* 39(6):1431-1446
- Stokes, M.A. y T.L. Smiley. 1968. An introduction to tree-ring dating. University of Chicago Press. Chicago. EUA. 73 p.
- Therrell, M.D., D.W. Stahle, M.K. Cleaveland y J. Villanueva-Díaz. 2002. Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *Journal of Geophysical Research* 107(D14):6-1 – 6-8
- Troup, A.J. 1965. The 'Southern Oscillation'. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 91(390):490-506.
- Viveros-Viveros, H., C. Saenz-Romero, J. Vargas-Hernandez, J. Lopez-Upton, G. Ramirez-Valverde y A. Santacruz-Varela. 2009. Altitudinal variation in *Pinus hartwegii* Lindl. I: height growth, shoot phenology and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management* 257(3):836-842.
- Williams, A.P., C.D. Allen, A.K. Macalady, D. Griffin, C.A. Woodhouse, D.M. Meko, T.W. Swetnam, S.A. Rauscher, R. Seager, H.D. Grissino-Mayer, J.S. Dean, E.R. Cook, C. Gangodagamage, M. Cai y N.G. McDowell. 2012. Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nature Climate Change* 3:292-297, en prensa. Doi: 10.1038/NCLIMATE1693.
- Wolter, K. y M.S. Timlin. 2011. El Niño/Southern Oscillation behavior since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI. ext). *International Journal of Climatology* 31(7):1074-1087.

Manuscrito recibido el 8 de marzo de 2013.

Aceptado el 29 de agosto de 2014.

Este documento se debe citar como:

Pompa-García, M., R. Dávalos-Sotelo, E. Rodríguez-Téllez, O.A. Aguirre-Calderón y E.J. Treviño-Garza. 2014. Sensibilidad climática de tres versiones dendrocronológicas para una conífera mexicana. *Madera y Bosques* 20(3):139-151.

Madera y Bosques

vol. 20 núm. 3 Otoño 2014

Se terminó de imprimir en el mes de diciembre de 2014

En los talleres de Tavera Hermanos, S.A. de C.V.

Av. Lázaro Cárdenas 3052. Col. Chapultepec Sur.

CP 58260, Morelia, Michoacán

La edición consta de 300 ejemplares
más sobrantes para reposición.



Contenido

artículos de actualidad

El efecto de la pandemia por COVID-19 en la responsabilidad social corporativa de las empresas

Laura Faba, Eva Díaz y Salvador Ordóñez

artículos científicos

Impacto del conocimiento de la salud y la nutrición en la adopción de hábitos saludables en la población adulta de México

Laura C. Ruelas Monjardín, Martha Elena Nava Tablada, Juan Cervantes y Víctor L. Barradas

El uso de la tecnología en la educación superior: un estudio de caso en la Universidad de la Ciénega

Jorge Enrique Macías-Sámano, Martha Laura Rivera-Granados, Robert Jones y Guillermo Ibarra

El uso de la tecnología en la educación superior: un estudio de caso en la Universidad de la Ciénega

Rosilani Trianoski, Setsuo Iwakiri e Jorge Luis Matos

El uso de la tecnología en la educación superior: un estudio de caso en la Universidad de la Ciénega

Rodrigo Ortiz y Robert Blanchette

El uso de la tecnología en la educación superior: un estudio de caso en la Universidad de la Ciénega

Moisés Aguilar-Alcántara, Silvia Aguilar-Rodríguez y Teresa Terrazas

El uso de la tecnología en la educación superior: un estudio de caso en la Universidad de la Ciénega

Idalia Zaragoza-Hernández, Amparo Borja de la Rosa, Francisco José Zamudio Sánchez, Víctor Rubén Ordóñez-Candelaria y Guadalupe Martha Bárcenas-Pazos

El uso de la tecnología en la educación superior: un estudio de caso en la Universidad de la Ciénega

Harald Fernández-Puratich, José Vicente Oliver-Villanueva, Mireya Valiente, Salvador Verdú y Nuria Albert

El uso de la tecnología en la educación superior: un estudio de caso en la Universidad de la Ciénega

Saúl Antonio Hernández Maldonado y Javier Ramón Sotomayor Castellanos

El uso de la tecnología en la educación superior: un estudio de caso en la Universidad de la Ciénega

Nery Alicia Tapia-Torres, Carmen de la Paz-Pérez-Olvera, Angélica Román-Guerrero, Alejandra Quintanar-Isaías, Eristeo García-Márquez y Francisco Cruz-Sosa

El uso de la tecnología en la educación superior: un estudio de caso en la Universidad de la Ciénega

Marín Pompa-García, Raymundo Dávalos-Sotelo, Efraín Rodríguez-Téllez, Oscar A. Aguirre-Calderón y Eduardo J. Treviño-Garza

notas científicas

Análisis cualitativo para el estudio de la percepción y el uso de la tecnología en la educación superior

José Antonio Hernández-Herrera, Luis Manuel Valenzuela-Núñez, Arnoldo Flores-Hernández y Julio César Ríos-Saucedo